PHYSIKALISCHE ZEITSCHRIFT

vereinigt mit dem

JAHRBUCH DER RADIOAKTIVITÄT UND ELEKTRONIK

Nr. 2 — 15. Januar 1929 — Redaktionsschluß für Nr. 4 am 10. Februar 1929. — 30. Jahrgang

INHALT:

Zusammenfassende Berichte:

A. Gyemant, Die elektrische Festigkeit flüssiger Isolierstoffe. S. 33.

Originalmitteilungen:

E. Rüchardt, Eine einfache Methode zur Bestimmung von C_p/C_v. S. 58.

R. Thaller, Über einen Fall von direktem Übergang der unselbständigen zur selbständigen Elektrizitätsleitung in stark ionisierten Gasen von hohem Druck. S. 59.

Besprechungen:

C. W. Oseen, Neuere Methoden und Ergebnisse der Hydrodynamik. S. 61.

A. Fraenkel, Einleitung in die Mengenlehre. S. 63.

J. Plassmann, Himmels-Almanach für das Jahr 1929. S. 63.

K. Menger, Dimensionstheorie. S. 63.

Berichtigungen. S. 64.

Tagesereignisse. S. 64.

Personalien. S. 64.

Angebote. S. 64.

ZUSAMMENFASSENDE BERICHTE.

Besorgt von R. Seeliger.

Die elektrische Festigkeit flüssiger Isolierstoffe.

Von A. Gyemant.

Mit 1 Abb.

Inhaltsübersicht.

1. Begriffsbestimmung und Stoffeinteilung.

I. Einfluß der isolierenden Flüssigkeit auf die Durchschlagsfeldstärke.

2. Chemische Konstitution.
3. Physikalische Struktur.

II. Einfluß der elektrischen Beanspruchung.

4. Feldverteilung.
5. Elektrodenabstand.
6. Elektrodenbeschaffenheit.
7. Leitwert.
8. Zeitliche Vorgänge.

III. Einfluß physikalischer Zustandsgrößen.

9. Temperatur.
10. Druck.

Literatur-Zusammenstellung.

1. Begriffsbestimmung und Stoffeinteilung.

Die primäre Größe, welche bei einem Durchschlagsversuch gemessen wird, ist die Durchschlagsspannung. Wenn man von dieser ursprünglichen Größe eine andere, nämlich die maximale Feldstärke ableiten und diese zweite in den Vordergrund zu stellen pflegt, so geht man dabei von der Vorstellung aus, daß die Bedingung des Durchschlags gleichbedeutend ist mit dem Erreichen einer Grenzfeldstärke.

Dem ist aber nicht so, denn das Erreichen einer Grenzfeldstärke ist zwar eine notwendige, jedoch nicht hinreichende Bedingung des Durchschlags. Was noch dazu gehört, mit anderen Worten, wie die genaue Bedingung lautet, ist aber noch nicht bekannt. Es sind insbesondere energetische Beziehungen, die noch dahinter stecken. Die maximale Feldstärke kann unmöglich genügen, wenn sie sich auf einen Punkt beschränkt: der Raum, in welchem sie herrscht, muß eine gewisse Ausdehnung, und zwar sowohl der Länge, wie dem Querschnitt nach besitzen, ebenso die Zeitdauer des Einwirkens. Das folgt unzweifelhaft aus der Abhängigkeit der Durchschlagsfeldstärke von der Elektrodenkrümmung, dem Elektrodenabstand, und der Dauer des Einwirkens.

Unter diesen Umständen ist die Betrachtung einer Durchschlagsfeldstärke, als einer wesentlichen Größe nicht ganz berechtigt, jedenfalls nicht ohne Willkür. Wenn z. B. die Durchschlagsfeldstärke mit dem Elektrodenabstand variiert, so könnte man entschieden mit demselben Recht die Durchschlagsspannung als primäre Größe behandeln. Nur die angenäherte Konstanz einer Durchschlagsfeldstärke hat dazu geführt, daß man diesen Begriff an die Spitze der Betrachtungen stellt. Es ist also unsere Wissenschaft in dieser Beziehung etwas provisorisches, was noch unbedingt abgeändert werden wird.

Die vorläufige Fassung lautet dann — insbesondere auf Flüssigkeiten spezialisiert — folgendermaßen. (Das bisher Gesagte gilt nämlich für alle Aggregatzustände.)

Man definiert eine Durchschlagsfeldstärke für eine ganz bestimmte Anordnung, deren einzelne Bestimmungsstücke alle gegeben sind. Und zwar definiert man als solche jene räumlich und zeitlich auftretende maximale Feldstärke, bei welcher die angelegte Spannung zusammenbricht oder aber sich ein dauernder Lichtbogen ausbildet, falls der erforderliche Strom nachgeliefert wird. Die Definition besagt also, daß bei inhomogener Feldverteilung, wie das ja bei den meisten praktisch vorkommenden Fällen vorliegt, immer die maximale Feldstärke in Betracht zu ziehen ist. Ebenso ist bei Wechselspannung der Maximalwert einzusetzen. Und endlich wird als Durchschlag der endgültige Zusammenbruch des Dielektrikums bezeichnet, etwaige Vorentladungen werden danach ausgeschaltet.

Das Ziel der physikalischen Forschung besteht nun zunächst darin, die Abhängigkeit dieser Größe von allen Bestimmungsstücken experimentell und theoretisch festzulegen. Erst wenn es gelingt, die Analyse so weit zu treiben, daß der Einfluß aller äußeren bestimmenden Faktoren bekannt ist, kann man daran gehen, statt der provisorischen Größe der Durchschlagsfeldstärke, eine oder wahrscheinlich mehrere theoretisch einwandfreie Größen abzuleiten, welche erst den Charakter von Materialkonstanten haben werden. Soweit ist man aber heute, besonders bei Flüssigkeiten, noch lange nicht. Und das liegt wieder an folgendem. Wenn man auch Druck, Temperatur, Feldform usw. soweit wie möglich konstant hält, die zu untersuchenden Objekte soweit wie möglich reinigt, dann wird die gemessene Durchschlagsfeldstärke bei ein und derselben Flüssigkeit immer noch beträchtlich schwanken, wenn man etwa Angaben verschiedener Autoren vergleicht. Von einem wirklich verläßlichen Zahlenmaterial, wie das etwa für den spezifischen Widerstand einer bestimmten Lösung, oder die Funkenspannung einer bestimmten Kugelanordnung in Luft vorhanden ist, kann unter diesen Umständen überhaupt nicht die Rede sein.

Dazu kommt noch, daß die Angaben eines und desselben Autors über eine bestimmte Anordnung auch nicht zu einer bestimmten Zahlenangabe führen. Die einzelnen Werte zeigen untereinander eine ziemlich starke Streuung. Diese läßt sich zwar bei sehr sorgfältigem Arbeiten herunterdrücken, aber meistens ist sie doch sehr stark vorhanden, so daß von einer sicheren Zahl nicht gesprochen werden kann. Die Tatsache der Streuung beweist das Vorhandensein von noch nicht bekannten bestimmenden Faktoren, die zugleich in dem Versuchsobjekt wenig definiert sind, ähnlich wie etwa beim Isolationswiderstand; derselbe ist auch keine genau festzustellende Zahl, weil die Anzahl der Ladungsträger im Material viel zu wenig definiert, im Gegenteil, sehr veränderlich ist. In unserem Fall sind es höchstwahrscheinlich winzige Einlagerungen einer zweiten Phase in Emulsions- oder Suspensionsform, sodann insbesondere Unregelmäßigkeiten der Elektrodenoberfläche, welche viel zu starken Einfluß auf die Durchschlagsfestigkeit haben und so ihre Konstanz trüben.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, daß die Streuung vielfach einen ausgesprochenen Gang hat. Derselbe hängt mit irreversiblen Veränderungen zusammen, die bei sich wiederholenden Beanspruchungen in dem Dielektrikum auftreten. Dadurch fällt die Möglichkeit fort, durch Mittelung aus einer möglichst großen Anzahl von Einzelwerten eine brauchbare Größe zu erhalten, wenngleich diese Methode unter gewissen Vorsichtsmaßregeln doch vielfach angewendet wird.

Immerhin ist aus dem Gesagten ersichtlich, daß das Idealziel, nämlich für eine bestimmte Flüssigkeit ein wirklich brauchbares Zahlenmaterial zu erhalten, noch nicht in greifbarer Nähe liegt. Der Hauptgrund ist wie gesagt der, daß man die letzten, wesentlich mitbestimmenden Faktoren noch nicht genügend kennt und sie dementsprechend in der Versuchsanordnung nicht genau festlegen kann. Dies ist die wichtigste Lücke, die noch zu füllen ist.

Solange wir nicht soweit sind, bleibt als einzige Möglichkeit zum Vorwärtskommen die Untersuchung der Abhängigkeit der Durchschlagsfeldstärke, wenigstens von jenen Faktoren, die uns genau bekannt sind. Und zwar hauptsächlich experimentell, dann aber auch theoretisch, indem man diese Abhängigkeit durch bestimmte Annahmen über den Mechanismus des Durchschlags physikalisch deutet und mathematisch ausdrückt. Alle diese Theorien werden aber nur Teilansätze provisorischer Art sein, da sie von der unzureichenden Annahme ausgehen, daß es nur auf das Erreichen einer Durchschlagsfeldstärke ankommt.

Der experimentelle Teil der Forschung ist in diesem Gebiet weiter fortgeschritten, als der theoretische. Dies nimmt auch nicht Wunder, wenn man bedenkt, daß auch die so gesichert scheinende Townsendsche Theorie für Gase neuerdings durch Rogowski ins Schwanken gebracht wurde. Für Flüssigkeiten dürften ja die theoretischen Unterlagen noch schwieriger liegen, als für Gase. Immerhin liegen verschiedene Versuche in dieser Richtung vor.

Das vorhandene Material soll im folgenden in drei Hauptgruppen eingeteilt werden. Die erste umfaßt den Einfluß des Isoliermaterials selbst. Es kommen dabei sowohl die chemische, wie die physikalische Zusammensetzung des Materials in Frage.

Die zweite Gruppe umfaßt die Faktoren der elektrischen Beanspruchung: die Feldverteilung, den Elektrodenabstand, die Elektrodenbeschaffenheit, den begleitenden Ableitungsstrom und die Zeitdauer der Beanspruchung.

Die dritte Gruppe umfaßt die begleitenden physikalischen Zustandsgrößen, als da sind Druck und Temperatur. Jeder Abschnitt behandelt zusammen die experimentellen und theoretischen Ergebnisse der bisherigen Forschung.

I. Einfluß der isolierenden Flüssigkeit auf die Durchschlagsfeldstärke.

2. Chemische Konstitution.

Man bemerkt, daß es sich in diesem Abschnitt gerade um den Punkt handelt, nämlich um das Auffinden einer Materialkonstante, dessen Beantwortung nach dem Gesagten nur in den ersten Anfängen steckt. Es ist daher nicht vieles zu erwarten.

Als erste Erfahrungstatsache mag der Satz aufgestellt werden, daß die Größenordnung der Durchschlagsfestigkeit bei allen isolierenden Flüssigkeiten dieselbe ist. Eine Veränderlichkeit um viele Zehnerpotenzen, wie man sie etwa beim Isolationswiderstand der verschiedenen Körper vorfindet, ist hier nicht vorhanden. Die Durchschlagsfestigkeit bewegt sich etwa auf dem Gebiet 100—1000 kV/cm.

Diese Grenzen sind natürlich nicht feststehend. Die obere Grenze befindet sich mit fortschreitender Entwicklung ständig im schwachen Steigen. Je reiner die verwendeten Stoffe sind, um so höhere Werte erhält man. Dies beweist auch schon, daß die Zahlen von heute nicht viel besagen, sie beziehen sich gerade auf den heute erreichbaren maximalen Reinheitsgrad der Stoffe, sind aber nicht von absolutem Wert. Als Vergleichszahlen sind sie natürlich brauchbar.

Der Grund dieser Einheitlichkeit wird natürlich darin zu suchen sein, daß es bei dem elektrischen Zusammenbruch von Flüssigkeiten hauptsächlich auf eine Eigenschaft desselben ankommt, welche bei allen quantitativ von derselben Größenordnung ist. Nun ist zwar eine allgemeingültige Theorie nicht vorhanden, soviel scheint aber sicher zu sein, daß die Annahme einer innermolekularen Aufspaltung wohl nicht wahrscheinlich ist. Dazu wären viel höhere Kräfte erforderlich, als die bisherigen Durchschlagsfestigkeiten sind. Viel wahrscheinlicher ist es, daß der intermolekulare Bau durchbrochen wird. Mit anderen Worten, es kommt hauptsächlich auf die physikalischen Eigenschaften der Stoffe an und nicht unmittelbar auf ihre chemische Gruppierung.

Eine vom Verf. herrührende Theorie, die noch an anderer Stelle geschildert wird, erklärt hauptsächlich die Kapillarkonstante als maßgebende Eigenschaft und an zweiter Stelle die Viskosität. Erstere ist ein Maß des Zusammenhalts der Molekeln und mit ihr muß offenbar die Durchschlagsfestigkeit ansteigen. Da die Kapillarkonstante bei allen Flüssigkeiten von derselben Größenordnung ist (20 bis 70 abs.), so ist damit der eingangs genannte Satz erklärt.

Die Viskosität erschwert den schnellen Ausgleich von kurzdauernden Störungen und setzt somit die Durchschlagsfestigkeit herab. Daraus erwächst der zweite allgemeingültige Satz, wonach unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen viskösere Flüssigkeiten geringere Festigkeit haben, als wenigviskose. Im allgemeinen haben tatsächlich Öle eine geringere Festigkeit, als die leichtflüssigen organischen Stoffe.

Außer diesen beiden allgemeinen Tatsachen glauben wir aber nicht, daß es möglich wäre Zusammenhänge zwischen chemischer Konstitution und Durchschlagsfestigkeit aufzuweisen. K. Przibram (1) hat versucht, einen solchen Zusammenhang aufzufinden und kam dabei zu dem Ergebnis, wonach in homologen Reihen die Durchschlagsfestigkeit mit zunehmender Kettenlänge abnimmt, Eintritt von Halogenatomen, Aminogruppen oder von Sauerstoffverbindungen die Durchschlagsfestigkeit erhöht. Dieses Ergebnis ist aber seither keineswegs bestätigt.

Wie gering der Einfluß der chemischen Natur des Isolators ist, beweist die Tatsache, daß destilliertes Wasser, als anorganischer Körper und guter Leiter nach A. Heydweiller (2) eine Festigkeit von etwa 52 kV/mm hat, also eine Festigkeit wie andere organische Körper. Auch M. Wien (3) konnte in seinen neuen Versuchen wäßrige Lösungen bis zu sehr hoher Feldstärke belasten, als Beweis, daß die Durchschlagsfestigkeit ebenfalls hoch liegt, wenn auch vielleicht nicht so hoch, wie Heydweiller es angibt. Neuere Versuche von E. Marx (s. Abschnitt 8) sprechen in demselben Sinne.

Aus der Literatur seien folgende vergleichende Zahlen bzw. verschiedener Flüssigkeiten herangezogen. Es sei nochmals betont, daß die Angaben verschiedener Autoren in keiner Weise miteinander vergleichbar sind.

E. Arnold (4) nennt folgende Zahlen:

Material	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm
Schmieröl	15
Isolierlack	50
Terpentinöl	65
Leinöl	80
Paraffin (geschmolzen)	80
Transformatorenöl	90

(In den meisten Tabellen dieser Darstellung bringen wir an der letzten Stelle auf 0 oder 5 abgerundete Zahlen. Eine größere Genauigkeit ist nicht am Platze.)

Die Angaben liegen alle äußerst niedrig, es handelt sich wahrscheinlich um ungereinigte Produkte.

Eine Versuchsreihe von J. Almy (5) lautet folgenderweise:

Isolierstoff	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm
Terpentinöl	250
Xylol	410
Benzol	530
Petroleum	580

J. Sorge (6) im Schumannschen Institut fand folgende Reihenfolge:

Flüssigkeit	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm
Hexan	430
Benzin	450
Xylol	470

Als Beweis für den zweiten Satz, den schon J. Flight (7) aufgestellt hat, möge eine von ihm angeführte Tabelle an Ölen wiedergegeben werden:

Viskosität	26	12	10
Durchschlagsfestigkeit in kV/cm	130	150	190

Unsere beiden Sätze finden in allen diesen Zahlen eine rohe Bestätigung. Weiteres Zahlenmaterial aufzuzählen ist überflüssig, da ihnen wie gesagt, nur relative Bedeutung zukommt.

3. Physikalische Struktur.

Die Frage nach der physikalischen Zusammensetzung einer Flüssigkeit könnte auf den ersten Blick widersinnig erscheinen. Eine Struktur kommt im allgemeinen nur festen Körpern zu. In der Tat hat die Frage bei einer absolut reinen Flüssigkeit keinen Sinn. Nur wenn irgendwelche Bestandteile in Form von Suspensions- oder Emulsionsteilchen darin enthalten sind, kann man von einer Struktur reden. Dies ist aber oft der Fall, wenn auch nicht immer absichtlich.

Sind aber in der isolierenden Flüssigkeit auch nur ganz wenig Teilchen enthalten, so werden diese nach Anlegung des Feldes infolge ihrer höheren Dielektrizitätskonstante an die Stelle höchster Feldstärke wandern. So hat man gerade an den Stellen, die für die Festigkeit in Betracht kommen, eine verhältnismäßig große Dichte dieser Teilchen.

Im allgemeinen konnte man zu folgenden Folgerungen kommen:

a) Verschiedene Einlagerungen, wie z. B. Fasern, sind von keinem Einfluß, sofern sie trocken sind. Sie sammeln sich zwar auch an, und bilden vielfach direkte Brücken zwischen den Elektroden, sind aber, da sie auch isolierende Eigenschaften haben, unschädlich.

b) Sind die Fasern feucht, oder sind direkt Wassertröpfchen in Emulsionsform in der Flüssigkeit vorhanden, so wirken sie herabsetzend auf die Durchschlagsfestigkeit. Dies äußert sich einmal in dem Auftreten sog. Vorentladungen. Das sind Funkendurchgänge, welche jedoch nicht zum ständigen Durchbruch führen. Der Funken wird nicht intensiv genug unterhalten, er bricht zusammen und die Flüssigkeit strömt rasch zur Funkenbahn hin, so daß der Ursprungszustand wiederhergestellt ist.

Der Grund dafür liegt darin, daß wenige gut leitende Teilchen die Vorentladung veranlaßt haben, durch Verdampfung aber rasch aus dem Feld entfernt werden. Da sie aus dem Nachbargebiet nur mit endlicher Geschwindigkeit in das Feld hineinströmen, so kommt es nur von Zeit zu Zeit zu wiederholten Vorentladungen, die unter Umständen auch ganz aufhören können. Es liegt dann eine Selbstreinigung des Isolators vor.

Es sei übrigens erwähnt, daß auch noch andere Umstände zu Vorentladungen führen können, so, wenn die Grenzfläche zwischen Metall und Dielektrikum viel Luft adsorbiert enthält. Diese Verhältnisse werden in Abschnitt 6 abgehandelt.

c) Ist der Gehalt des Isolators an Wasserteilchen (in Tröpfchen oder Faserform) groß genug, dann kommt es nicht zu Vorentladungen, vielmehr wird schon bei der geringen Spannung der endgültige Zusammenbruch herbeigeführt, die Durchschlagsfestigkeit der Flüssigkeit nimmt daher ab.

Andere Bestandteile, außer von Fasern von geringer Dielektrizitätskonstante und Wassertropfen kommen in der Praxis nicht vor, hätten daher höchstens theoretisches Interesse. Bei öfters wiederholten Durchschlägen kann es auch zur Bildung von Rußteilchen kommen, die ihrerseits zur Bildung leitender Brücken führen können.

Es sollen nun wieder einige Literaturangaben zur Beleuchtung des eben Gesagten herangezogen werden.

Almy (5) hat Xylol in verschiedener Weise vorbehandelt und dabei folgende Festigkeiten erhalten. (Funkenstrecke 0,4 mm.)

Art der Vorbehandlung	Durchschlagsfeldstärke in kV/mm (Maximalwerte)
Unbehandelt	19
Filtration durch Seide .	30
„ „ Tonzelle	64

H. Zipp (8) hat Transformatorenöl bei verschiedener Temperatur während einer Stunde getrocknet und dadurch die Festigkeit des Öls erhöht.

Temperatur in C	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm
80	138
90	140
100	145
110	149

Weitere Erhöhung der Trocknungstemperatur bewirkte Abnahme der Durchschlagsfeldstärke infolge sekundärer Veränderungen im Öl, Verbrennung usw.

Ähnlich wirkt die Dauer des Trocknens:

Trocknungsdauer in Stunden (110°)	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm
0	138
1	144
2	147
3	148
4	149

Sehr eingehend hat W. Spath (9) den Einfluß von fremden Bestandteilen auf die Durchschlagsfeldstärke von Transformatorenöl untersucht. Seine Untersuchungen lassen sich tabellarisch folgendermaßen zusammenfassen:

Behandlungsmethode des Öls	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm Elektr. Abst. 4 mm
Unbehandelt	50
In der Ölschleuder geschleud.	70
2 Stund. aus 115° C erwärmt, durch Haarsieb filtriert . . .	100
3× durch Filtrierpapier filtr. . .	130
Durch Spezialfilter (Zeiss) filtr., dann 4 St. a. 115° erwärmt	200
Dasselbe, jedoch Filtrationstemp. 60° C	340

In ähnlicher Weise hat den Einfluß der Beimengungen F. Schröter (10) untersucht, wobei verschiedene Filterarten ausprobiert worden sind:

Behandlungsart	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm
Unbehandeltes Öl	50
Tonzellenfilter	120
Zentrifuge	130
Papierfilter	160
Membranfilter	180
Gehärtetes Filter (einmal)	230
Gehärtetes Filter (zweimal)	330

K. Dräger (11) hat neben den schon erwähnten Methoden auch noch die elektrische Reinigung herangezogen, indem er hohe Gleichspannung angelegt hat. Durch Kataphorese wanderten die Teilchen an die Kathode, da sie positiv geladen sind. Das elektrisch gereinigte Öl hatte eine Durchschlagsfestigkeit bis über 600 kV/cm.

Einige Autoren, so auch Spath in der zitierten Arbeit (9) versuchten die Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt quantitativ zum Ausdruck zu bringen. Man erhält eine sehr charakteristische Kurve, indem mit steigendem Wassergehalt die Durchschlagsfestigkeit anfangs sehr rasch, dann sehr langsam abnimmt. Wir erörtern diese Verhältnisse hier, da es sich nicht etwa um chemisch gelöstes Wasser, vielmehr um richtige Emulsionen handelt, wie das mikroskopisch festgestellt werden kann.

Das Charakteristische erhellt z. B. aus folgender Tabelle, welche aus einer Arbeit von F. Peek (12) entnommen wurde.

Wassergehalt in Promille	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm
0,0	130
0,1	40
0,2	35
0,3	30
0,4	27
0,5	25

Einen ähnlichen Verlauf hat auch die Spathsche Kurve, ferner die von R. Friese (13).

Verf. (14) hat den Versuch gemacht, diesen charakteristischen Gang theoretisch abzuleiten. Der Gedankengang hierbei war folgender. Die Wassertropfen, welche kugelförmig gedacht sind, sind als Einlagerungen hoher Dielektrizitätskonstante aufzufassen. Sie erleiden daher einen Zug in Richtung des Feldes, da ihre Polarisation mit zunehmender Streckung zunimmt. Andrerseits sind die Teilchen bestrebt, eine möglichst geringe Oberfläche einzunehmen. Die beiden Bestre-

bungen sind entgegengesetzt und so wird sich ein Zustand einstellen, bei dem sich beide Kräfte das Gleichgewicht halten.

Zahlenmäßige Durchführung der Theorie führt zu folgendem Ergebnis. Bezeichnet r den Radius der Wassertröpfchen, γ die Kapillarkonstante zwischen Wasser und Öl, $\mathfrak{E}$ die angelegte Feldstärke, dann besteht zwischen der Energie E eines Tröpfchens und der Exzentrizität e des durch die Streckung sich bildenden Rotationsellipsoides die Beziehung

$$E = 2\pi r^2\gamma\left[\left(\sqrt[3]{1-e^2} + \frac{\arcsin e}{e\sqrt[6]{1-e^2}}\right) - \frac{r\mathfrak{E}^2}{12\pi\gamma}\,\frac{1-e^2}{e^2}\left(\frac{1}{2e}\ln\frac{1+e}{1-e} - 1\right)\right].$$

Man hat nun $\frac{\delta E}{\delta e}$ zu bilden und den erhaltenen Ausdruck Null zu setzen, die so gewonnene Beziehung gibt den Zusammenhang zwischen e in der Gleichgewichtslage und $\mathfrak{E}$, der angelegten Feldstärke. Man erhält dann einen ziemlich linearen Zusammenhang zwischen der Feldstärke und der stattgehabten Streckung, indem beide gleichzeitig anwachsen.

Erfährt nun die Streckung einen so hohen Grad, daß die benachbarten Teilchen sich berühren können, dann tritt ein Zusammenfließen ein und es bildet sich ein leitender Kanal aus, was mit einem Kurzschluß, bzw. einem Durchschlag identisch ist. Je größer die Anzahl der Teilchen bei um so geringerer Feldstärke wird dieses Zusammenfließen erreicht. Man kann also die vorhin erörterte Peeksche Kurve berechnen. Diese Rechnung wurde für die bei Friese vorhandenen Verhältnisse ausgeführt, und mit dem Experiment verglichen. Das Ergebnis sei tabellarisch mitgeteilt:

Konzentration des Wassers in Promille	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm beobachtet	berechnet
0.01	140	140
0,1	30	50
0,2	25	40
0,5	25	30
1,0	20	25

Die Zahlen sind hier (wie auch sonst in der Darstellung), abgerundet. Der Gang der beobachteten und berechneten Kurve ist derselbe, wie auch die absolute Größe der Zahlen.

Viele der aufgezählten Arbeiten enthalten auch Angaben darüber, daß die Streuung der gemessenen Werte mit zunehmender Reinigung abnimmt. Dies spricht in dem im ersten Abschnitt auseinandergesetzten Sinne, wonach die Streuung zum Teil von unkontrollierbaren Einflüssen seitens des Dielektrikums herrührt. Wir wollen aus der schon zitierten Arbeit von Schröter (10) einen Beleg hierfür anbringen. In folgender Tabelle steht der beobachtete Maximal- und Minimalwert in Prozenten von dem Mittelwert gerechnet.

Behandlungsart	Maximale Durchschlagsfeldstärke	Minimale Durchschlagsfeldstärke
Unbehandeltes Öl . .	200	50
Tonzellenfilter . . .	160	40
Zentrifuge	140	70
Papierfilter	160	60
Membranfilter	110	90
Gehärtetes Filter (einmal)	107	93
Gehärtetes Filter (zweimal)	106	93

Man sieht deutlich, wie die Streuung mit zunehmender Reinigung abnimmt.

In einer recht bemerkenswerten Arbeit von J. Hayden und W. Eddy (15) kamen jedoch die Verfasser zu einem anderen Ergebnis. Sie untersuchten nämlich eine recht große Menge des Öls, und zwar erzeugten sie 500 Durchschläge hintereinander, um die Natur der Streuung aufzuklären. Der sich an den Elektroden bildende Ruß wurde nach jedem Durchschlag fortgewischt. Die große Menge des Öls ermöglichte das Fortschwemmen etwaiger Verbrennungsprodukte. Verschiedene Elektrodenkombinationen wurden durchgemessen und für jede die Streuungsverteilungskurve aufgenommen. Sie erhielten auch bei weitgehend gereinigten Produkten verhältnismäßig starke Streuung (bis zu 24 Proz.) und kamen daher zum Ergebnis, daß die Streuung noch verstecktere Ursachen hätte, als die Verunreinigung, da eben letztere weitgehend beseitigt war.

Es soll nach diesen Autoren auch ein Wahrscheinlichkeitsmoment mitspielen, so daß die Streuung prinzipiell nicht zu vermeiden wäre. Man erhält einen Mittelwert, um welchen die anderen Werte nach einer Wahrscheinlichkeitskurve angeordnet sind. Bezeichnet x die prozentuale Abweichung vom Mittelwert und $y\,dx$ die Häufigkeit der vorhandenen Durchschlagswerte zwischen x und $x + dx$, so ist y von der Form

$$y = a\,e^{-bx^2}.$$

Allgemein ist diese Auffassung nicht durchgedrungen; wir kommen im 7. Abschnitt noch auf sie zurück.

Weiteren Momenten, welche die Streuung bewirken könnten, werden wir im Laufe der Darstellung noch begegnen, aber vollständig ist diese Lücke in unserer Kenntnis noch nicht gefüllt.

Neuerdings hat W. Zimmermann (16) die außerordentlich hohe Streuung bei verschiedenen Ölen durch eine große Anzahl von Versuchen dargelegt. Die Streuung beträgt bis 100 Proz. nach oben und 60 Proz. nach unten. Im allgemeinen findet er bei wiederholten Messungen eine Steigerung der Durchschlagsfeldstärke, infolge der schon erwähnten Selbstreinigung. Er diskutiert seine Ergebnisse besonders in Hinsicht auf die zur Zeit geltenden Prüfbestimmungen des VDE., welche seiner Ansicht nach den sehr erheblichen Schwankungen nicht genügend Rechnung tragen.

II. Einfluß der elektrischen Beanspruchung.

4. Feldverteilung.

In Fragen der Durchschlagsfestigkeit muß die Feldverteilung allgemein in zweifacher Weise in Betracht gezogen werden.

1. Ist der kürzeste Abstand zwischen den Elektroden d, so ist die Durchschlagsfeldstärke $\mathfrak{E}_D$ nur im Falle ebener Elektroden durch die Beziehung

$$\mathfrak{E}_D = \frac{V}{d}$$

gegeben, wo V die angelegte Spannung, bei der Durchbruch erfolgt. Im Falle gekrümmter Elektroden gilt diese einfache Beziehung nicht mehr. Da das Feld inhomogen ist, so ist es in der Nähe der Elektrode größer als $\frac{V}{d}$ und in der Mitte zwischen den Elektroden kleiner. Die Berechnung wechselt von Fall zu Fall, entsprechend der Elektrodenform. Am einfachsten behandelt man sie nach A. Schwaiger (17) tabellarisch in folgender Weise. Man führt einen Faktor, den sog. Ausnutzungsfaktor η ein, in dem Sinne, daß $\frac{V}{\eta d}$ dem Wert der höchsten Feldstärke bei einer bestimmten Anordnung entspricht. η ist demnach ein echter Bruch. Im Falle zweier Kugeln z. B. ist sein Wert von der Größe

$$p = \frac{r + d}{r}$$

abhängig, wo r = Kugelradius. Ebenso für den Fall, daß eine Kugel einer Ebene gegenübersteht. In folgender Tabelle bringen wir einen Auszug aus der Schwaigerschen Tabelle. Aus den geometrischen Daten der Anordnung berechnet man p und sucht das entsprechende η heraus. Dann ist

$$\mathfrak{E}_D = \frac{V}{\eta d}$$

Zwei-Kugelanordnung		Kugel gegen Ebene	
p	η	p	η
1	1	1	1
1,2	0,94	1,2	0,88
1,4	0,88	1,4	0,78
1,6	0,82	1,6	0,70
2	0,732	2	0,563
3	0,563	3	0,372
4	0,449	4	0,276
5	0,372	5	0,218
6	0,318	6	0,178
7	0,276	7	0,152
8	0,244	8	0,133
9	0,218	9	0,117
10	0,197	10	0,105

2. Das bisher Gesagte bezieht sich aber nur auf die Ermittlung der maximalen Feldstärke. Außerdem ist zu beachten, daß die so ermittelte Durchschlagsfeldstärke nun immer noch keine Konstante ist (nämlich unter sonst denselben Umständen, also bei gleicher Flüssigkeit, gleicher Temperatur usw.), sondern noch mit der Elektrodenkrümmung variiert.

Zur Belegung dieses Sachverhaltes mag zunächst eine Versuchsreihe von J. Sorge (6) genannt werden. Er hat Platte gegen Platte, Kugel gegen Kugel und Spitze gegen Spitze verglichen. Die bezüglichen Krümmungsradien sind 50, 3,5 und 0,5 mm. Der Abstand beträgt beim Hexan und Benzin 0,5, beim Öl 1 mm. Die Durchschlagsfeldstärken sind:

Krümmungsradius	Hexan	Benzin	Öl
50 mm	390 kV/cm	330	250
3.5	450	380	260
0.5	470	390	310

Ziemlich weitgehende quantitative Untersuchungen liegen in dieser Beziehung von englischen Forschern vor. So wurde von der Electrical Research Association (18) folgende Versuchsreihe ausgeführt. Als Flüssigkeit dient weitgehend gereinigtes Öl. Die Zahlen geben die Durchschlagsfeldstärke in kV/cm an.

Entfernung in mm:	1,27	1,90	2,54	3,17	3,81
Kugelrad. in mm					
4,8	410	350	310	325	310
6,3	375	310	320	310	280
9,5	350	305	300	—	260
12,7	350	265	290	265	250

Wir betrachten nun je eine vertikale Kolonne, gültig für einen bestimmten Abstand und sehen, daß genau so, wie bei den Sorgeschen Versuchen,

die Durchschlagsfeldstärke mit zunehmender Krümmung zunimmt. Die Betrachtung je einer horizontalen Reihe für sich wird im nächsten Abschnitt unternommen.

Ähnliche Versuche liegen auch von Peek (19) vor. Wir geben im folgenden seine Ergebnisse:

Entfernung in cm	0,5	1,0	1,5	2,0
Kugelradius in cm				
0,55	280	240	—	—
1,27	225	185	175	170
3,12	220	165	150	140
6,25	220	160	140	125

A. Heydweiller (20) hat für Gase den Zusammenhang zwischen $\mathfrak{E}_D$ und r, dem Kugelradius bei großen Abständen durch den Ausdruck

$$\mathfrak{E}_D = a + \frac{b}{\sqrt{r}}$$

darstellen können, wo a und b Konstanten sind und a offenbar den Grenzwert für die homogene Anordnung angibt. M. Töpler (21) hat diese Gleichung auch bestätigen können. Wie leicht nachzuweisen, gehorchen obige Befunde von Peek und der E. R. A. auch dieser Beziehung. So hat man für die Peekschen Befunde für $\frac{d}{r} = 0{,}4$

$$\mathfrak{E}_D = 10 + \frac{250}{\sqrt{r}}$$

und für $\frac{d}{r} = 1{,}2$

$$\mathfrak{E}_D = 18 + \frac{180}{\sqrt{r}}.$$

Die Konstanten sind also vom Verhältnis $\frac{d}{r}$ abhängig, im übrigen nimmt die Durchschlagsfeldstärke umgekehrt proportional aus der Wurzel des Krümmungsradius zu.

Peek hat ähnliche Untersuchungen auch an Zylinderelektroden angestellt und obige Beziehung angenähert auch bestätigt gefunden. Einen Auszug seiner Befunde gibt folgende Tabelle.

Innerer Zylinderradius in cm	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm
2,5	60
1,6	75
1,2	80
0,6	90
0,3	110

Zylinderelektroden haben gewisse Vorteile Kugelelektroden gegenüber, so insbesondere die Gleichmäßigkeit des Feldes und die Schutzwirkung äußeren Störungen gegenüber. In Schweden wird aus diesem Grund die Zylinderanordnung für die Prüfung von Ölen verwendet.

Die Ursache der Abhängigkeit der Durchschlagsfeldstärke von der Elektrodenkrümmung ist nicht sicher bekannt. Wahrscheinlich hängt es damit zusammen, daß das Feld zu ungleichmäßig ist, infolgedessen die Elektrodenfläche höchster Feldstärke zu gering ausfällt. Es scheint, als ob es nicht gleichgültig wäre, wie groß diese Fläche ist, als ob sie eine untere Grenze haben würde. Jedenfalls ist dieselbe Abhängigkeit, wie erwähnt, auch bei Gasen vorhanden. Dort wird sie ebenfalls damit in Zusammenhang gebracht, daß die Anzahl der gebildeten Ionen nicht den erforderlichen Grenzwert erreicht.

Der eigentliche Mechanismus des Durchschlages ist nun bei Flüssigkeiten noch nicht sicher festgestellt, daher kann auch dieser Umstand nicht so genau erklärt werden. Es ist möglich, daß es sich hier auch um Stoßionisation handelt. Nach der Theorie des Verf., welche später noch erörtert wird, dürften bei zu starker Krümmung die an den Elektroden vorhandenen Gasreste nicht ausreichen, um bei der Durchschlagsfeldstärke von Plattenelektroden den Durchschlag herbeizuführen. Es ist aber auch möglich, daß die sonstigen Verunreinigungen im Felde zu wenig werden. Dagegen spricht allerdings, daß der Effekt auch an reinsten Ölen vorhanden ist.

Nicht nur die Krümmung, sondern auch die Fläche an und für sich ebener Elektroden hat auf die Durchschlagsfestigkeit einen dem vorigen durchaus analogen Einfluß. F. Farmer (22) hat diesen Einfluß quantitativ untersucht. Wie man aus folgender Tabelle sieht, ist der Effekt nur bei kleineren Abständen ausgeprägt.

Abstand	0,25 mm	1 mm	5 mm	18,7 mm
Durchm. d. Platte				
2,5 mm	250 kV/cm	180 kV/cm	100 kV/cm	40 kV/cm
10,0	45	130	90	40
25	40	90	80	35
75	35	70	70	30

Dies dürfte auch verständlich sein, da ein Mangel an Ionen oder Gasresten oder was es auch sonst sei, bei großem Abstand nicht auftreten kann. Die genügende Länge der Strecke gleicht in diesem Fall die ungenügende Fläche aus.

Bei dieser Gelegenheit sei erwähnt, wie vorsichtig man sein muß, wenn man theoretische Ergebnisse auf die Praxis anwenden will. In Abschnitt 3 haben wir gesehen, daß die Durchschlags-

festigkeit von Ölen mit steigender Feuchtigkeit stark abnimmt. Nun hat A. Schwaiger (23) darauf aufmerksam gemacht und F. Wöhr (24) des Genaueren nachgewiesen, daß es keinen Zweck hätte, bei Hochspannungsmaschinen und Transformatoren mit dem Trocknungsgrad des Öles sehr weit zu gehen, da man von einem bestimmten Punkt ab keine nennenswerte Verbesserung der Anordnung erhält. Der Grund dafür liegt darin, daß die an den Maschinen am meisten gefährdeten Stellen durch Kanten dargestellt werden. Bei solchen ist der Ausnutzungsfaktor infolge der starken Krümmung sehr klein. Wöhr hat aus der Durchschlagsfeldstärke und der Durchschlagsspannung den Ausnutzungsfaktor ermittelt und gefunden, daß er mit steigender Feuchtigkeit des Öles zunimmt. Das hat darin seinen Grund, daß die scharfen Kanten durch die mikroskopischen Wassertropfen im Öl abgerundet werden: Die Festigkeit der Anordnung wird aus diesem Grunde mit steigender Feuchtigkeit besser. Man darf daher für die Beurteilung der Isolation nicht allein die Ergebnisse der Messungen an Kugelfunkenstrecken zugrunde legen.

L. Dreyfuss (25) versuchte es, demselben Problem theoretisch nahezukommen. Er nahm an, daß außer einer Grenzfeldstärke längs des Gebietes, wo letztere vorhanden ist, auch noch die Spannung einen Grenzwert erreichen muß. Als zweite Bedingung setzte er demnach

$$\int_{a_1}^{a} \mathfrak{E}\, dx \geqq E_{\text{krit}} .$$

Dies ist eine recht bemerkenswerte Erweiterung der Theorie ganz im Sinne unserer Ausführungen in Abschn. 1. Leider ist der Ansatz in dieser Form nicht allgemein gültig.

Für den Fall zweier Vierkanten ergibt die Rechnung für die Anfangsspannung

$$E = k a^{\frac{2}{3}}$$

(k = Konstante, a = Schlagweite). Messungen bei Brown, Boveri & Co. (26) an technisch reinem Öl zwischen Vierkanten bestätigten diese Bezeichnung. Für k hatte man 38, falls a in cm und E in kV_{eff} gemessen wird.

5. Elektrodenabstand.

An und für sich wäre nicht zu erwarten, daß die Durchschlagsfestigkeit vom Elektrodenabstand abhängt, zumindest nicht, wenn man von der Vorstellung ausgeht, daß es hauptsächlich auf die höchste Feldstärke an der am stärksten gekrümmten Elektrode ankommt. Tatsächlich findet man jedoch bei kleinen Abständen doch eine Abhängigkeit. Diese Abhängigkeit zusammen mit der im vorigen Abschnitt behandelten, bedarf am ehesten einer theoretischen Klärung. Wie schon im ersten Abschnitt auseinander gesetzt, wird jede Theorie, welche eine Grenzfeldstärke als hinreichend für den Durchschlag annimmt, in diesem wesentlichen Punkt einen Fehler begehen, eben weil es nicht allein auf eine Feldstärke, sondern auch noch auf eine Mindestenergie ankommt. Schon im vorigen Abschnitt sahen wir, daß neben der Feldstärke auch noch der Umfang der Elektrodenfläche mitbestimmend ist. Ebenso sehen wir hier, daß es auch auf die gesamte Weglänge ankommt. Je kürzer dieselbe, um so höher die Durchschlagsfeldstärke. Es scheint also ausdrücklich, als ob neben der höchsten Feldstärke auch der Rauminhalt zwischen den Elektroden von Wichtigkeit wäre. Je kleiner derselbe, um so höher die Durchschlagsfestigkeit. Die im vorigen Absatz behandelte Erweiterung der Theorie von Dreyfuss gilt gerade für Plattenanordnung überhaupt nicht, sodaß sie in diesem Zusammenhang nicht mehr in Frage kommt. Sie beschränkt sich eben für den Fall von Kanten.

Während für die Abhängigkeit von der Elektrodenkrümmung dieser Zusammenhang mathematisch durch die Heydweillersche Gleichung ausgedrückt wird, mit welcher theoretisch einstweilen wenig anzufangen ist, haben wir hier erfahrungsgemäß einen Zusammenhang, der etwas einfacher zu sein scheint. Man findet nämlich vielfach

$$\mathfrak{E}_D = A + \frac{B}{d}$$

falls d der Elektrodenabstand. Ist d hinreichend klein, so wird daraus

$$\mathfrak{E}_D\, d = B$$

mit anderen Worten, die Durchschlagsspannung wird von der Entfernung unabhängig. Jene scheint demnach aus zwei Termen zu bestehen, einer konstanten Größe und einer, welche dem Abstand proportional ist. Außer der Feldstärke kommt es eben noch auf eine minimale Spannung an, welche nicht unterschritten werden kann.

In Gasen sind diese Verhältnisse viel genauer durchgeforscht. Die experimentellen Angaben sind auch sicherer und theoretisch hat man auch den Vorteil, daß die Vorgänge wesentlich durchsichtiger sind als bei Flüssigkeiten. Dort wurde daher von W. O. Schumann (27) für diesen Fall eine recht weitgehende mathematische Theorie entwickelt. Demnach wird die Anzahl der Ionen bei geringen Schichtdicken so klein, daß sie in erster Linie das Kriterium des Durchschlages angibt. Da diese Anzahl von der Gesamtspannung längs des Durchschlagsweges abhängt, so ist obige empirische Formel bis zu einem gewissen Grade verständlich.

Demgegenüber ist dreierlei zu erwähnen:

1. ist obige Gleichung durchaus nicht sichergestellt. Verfasser vermutet, daß der Zusammenhang eher durch eine Gleichung von der Form

$$\mathfrak{E}_D = a + \frac{b}{\sqrt{d}}$$

wiedergegeben wird, wodurch die Bedingung $\mathfrak{E}_D d =$ konstant hinfällig wird, da für kleine Entfernungen $\mathfrak{E}_D^2 d =$ konstant herauskommt. Indessen würde die Diskussion dieser Verhältnisse hier zu weit führen.

2. werden wir noch sehen, daß es gerade bei Flüssigkeiten sehr zweifelhaft ist, ob wirklich eine Volumionisation dem Durchschlag zugrunde liegt. Vermutlich sind es hier anders geartete Vorgänge, welche zum Durchschlag führen. Dann kann man aber die analogen Überlegungen an Gasen nicht ohne weiteres übertragen.

3. Und 3. liegen gerade an Flüssigkeiten vielfach Befunde vor, welche ein durchaus lineares Ansteigen der Spannung mit dem Abstande ergeben. Die Zunahme der Festigkeit mit abnehmender Stärke ist hier also nicht in dem Maße gesichert, wie für Gase und auch für feste Dielektrika.

Die im vorigen Abschnitt gebrachten Ergebnisse von Whitehead, Peek und Farmer zeigen allerdings deutlich eine solche Abhängigkeit. Die Versuche von Schröter (10) lassen dagegen in keiner Weise eine solche Veränderlichkeit erkennen. Folgende Tabelle gibt die Zahlen für zwei Öle verschiedenen Reinheitsgrades an.

Abstand in mm	Öl einmal filtriert	Öl zweimal filtriert
0.2	—	325 kV/cm
0.3	230 kV/cm	—
0.4	—	305
0.5	225	—
0.8	220	350
1.0	—	335
1.1	230	—

Ebenso linear verläuft die Spannung in Abhängigkeit von dem Abstand bei den Versuchen von Toriyama (28) im Institut von Rogowski, denen man wegen ihrer Sorgfalt viel Wert beilegen muß. Er untersuchte den Bereich von 0,1—1 mm. Folgende Tabelle gibt einen Auszug seiner Versuche.

Abstand in mm	Öl *A* Gleichspannung	Öl *A* Wechselspannung	Öl *B* Gleichspannung	Öl *B* Wechselspannung	Öl *C* Wechselspannung
0.1	500 kV/cm	—	—	—	—
0.3	470	470 kV/cm	500 kV/cm	500 kV/cm	420 kV/cm
0.5	470	470	500	500	450
0.7	460	460	490	490	470
0.9	—	450	470	470	470

Der Gang der Durchschlagsfestigkeit ist sehr gering, bei der letzten Probe sogar ansteigend. Zu bemerken ist noch, daß alle Öle (*A* unbekannter Herkunft, *B* russisches, *C* amerikanisches Öl) fünfmal mittels Glas bzw. Porzellanfilter gereinigt worden sind.

Einen geradlinigen Verlauf erhielt auch P. Shaw (29) an Raps-, Fusel-, Lein- und Lebertranöl bei Abständen von 1—5 mm, ferner I. Hayden und C. P. Steinmetz (30) an Paraffinöl bei Abständen von 1—5 mm, endlich E. Wedmore (31) an Öl bei Abständen von 1—5 mm.

Demgegenüber finden zunehmende Festigkeit mit abnehmendem Abstand: E. Jona (32) an Transformatorenöl im Gebiet von 1—20 mm, M. Vogelsang (33) bei Öl und Benzinoform im Abstand von 1—5 cm.

Messungen von W. Spath (9) sind in dieser Beziehung nicht ganz eindeutig. Weitgehend gereinigte Öle zeigen tatsächlich eine Festigkeitszunahme mit abnehmendem Abstand. Ungenügend gereinigte Öle weisen dagegen sogar ein Minimum auf.

Abstand in mm	Spezialfilter bei 60°	Gewöhnl. Filter 3 mal bei 40°	Ölschleuder
1	380 kV/cm	230 kV/cm	70 kV/cm
2	350	170	60
3	345	140	65
4	345	130	70
5	—	135	80
6	—	120	100
7	—	120	110
8	—	120	110

Zwischen diesen Versuchen besteht unzweideutig ein Widerspruch. Es hat aber den Anschein, als ob bei weitgehend gereinigten Ölen doch eine Abhängigkeit vom Abstand vorhanden wäre und daß dieselbe bei ungenügend gereinigten Ölen durch sekundäre Erscheinungen verdeckt wird. Jedenfalls geht aus den Versuchen von K. Dräger (11) ein solcher Tatbestand hervor. Folgende Zahlen geben seine Befunde wieder.

Abstand in mm	Öl ungereinigt	Öl gereinigt	Öl gereinigt u. getrocknet
1	50 kV/cm	220 kV/cm	300 kV/cm
2	40	185	220
4	35	—	185
5	—	130	185
6	35	—	185
8	35	—	—
10	30	—	—

Das steile Ansteigen der Festigkeit bei 1 mm ist jedenfalls beim letzten Öl am ausgeprägtesten. Aber der Versuch, bei diesen widersprechenden Angaben eine Gleichung anzuwenden, wäre unseres Erachtens ziemlich verfehlt.

Die sehr ausführliche Untersuchung von J. Sorge (6) erstreckt sich auch auf die hier behandelte Frage und ist schon deshalb von besonderem Wert, da sie außer dem Öl auch andere dielektrische Flüssigkeiten behandelt. Er hat drei verschiedene Krümmungsradien (s. vorigen Abschnitt) und untersucht insbesondere Abstände unterhalb 1 mm. Wir führen hier die Versuche an, welche mit Plattenelektroden ausgeführt sind, weil sie keine Störung infolge Ungleichmäßigkeit des Feldes enthalten.

Abstand in mm	Xylol kV/cm	Hexan kV/cm	Benzin kV/cm	Transformatorenöl kV/cm
0,1	680	—	—	—
0,2	605	—	495	—
0,3	555	435	440	—
0,4	—	395	405	—
0,5	505	375	375	—
0,6	490	350	350	—
0,7	485	340	225	—
0,8	—	—	—	270
1,0	—	—	—	250
1,2	—	—	—	235
1,4	—	—	—	220

Die Werte liegen alle hoch, entsprechend dem Reinheitsgrad der Produkte.

Die oben erwähnte Formel

$$\mathfrak{E}_D = A + \frac{B}{d}$$

erhält besonders durch englische Autoren eine gewisse Bestätigung. Die Electrical Research Association (18) hat Durchschlagsversuche bei einem Öl hohen Reinheitsgrades ausgeführt, und zwar mit Elektroden von 1,25 und 2,5 cm Krümmungsradius.

Abstand in mm	Radius 1,25 cm Mittelwert kV/cm	Radius 1,25 cm Höchstwert kV/cm	Radius 2,5 cm Mittelwert kV/cm	Radius 2,5 cm Höchstwert k/Vcm
1,27	245	310	220	305
1,90	235	260	200	240
2,54	225	250	195	225
3,18	220	260	200	235
3,82	215	240	200	235

Die diesen vier Fällen entsprechenden Gleichungen sind der Reihe nach (d in cm gemessen):

$$\mathfrak{E}_D = 170 + \frac{9}{d}$$

$$\mathfrak{E}_D = 190 + \frac{14}{d}$$

$$\mathfrak{E}_D = 180 + \frac{3}{d}$$

$$\mathfrak{E}_D = 190 + \frac{10}{d}$$

In ähnlicher Weise lassen sich die Versuche von Peek (19) auswerten.

Abstand in mm	Radius 1,25 cm Mittelwert kV/cm	Radius 1,25 cm Höchstwert kV/cm	Radius 2,5 cm Mittelwert kV/cm	Radius 2,5 cm Höchstwert kV/cm
1,27	160	195	160	185
1,90	150	190	152	180
2,54	140	175	140	165
3,18	125	150	130	150
3,82	125	145	130	155

$$\mathfrak{E}_D = 89 + \frac{10}{d}$$

$$\mathfrak{E}_D = 110 + \frac{12}{d}$$

$$\mathfrak{E}_D = 100 + \frac{8}{d}$$

$$\mathfrak{E}_D = 120 + \frac{9}{d}$$

Auf sehr kleine Entfernungen beziehen sich folgende Versuche der E. R. A. (18), welche an Elektroden mit 0,63 cm Radius ausgeführt worden sind.

Abstand in mm	Mandelöl	Zedernöl
0,012	220 kV/cm	300 kV/cm
0,05	140	200
0,10	90	130
0,15	70	110
0,20	60	100
0,25	55	90

Es sind Öle von hoher Dielektrizitätskonstante und entsprechend niedriger Durchschlagsfestigkeit bei den üblichen Abständen. Die Abhängigkeit scheint hier von der Form

$$\mathfrak{E}_D = a d^{-n}$$

zu sein als Beweis dafür, daß eine allgemein gültige Formel nicht vorhanden ist.

Dementsprechend läßt sich die Theorie nicht quantitativ zur Erklärung der Erscheinung heranziehen. Peek (19) hat es noch am weitgehendsten versucht, die Gleichung

$$\mathfrak{E}_D = A + \frac{B}{d}$$

theoretisch abzuleiten, indem er von der Annahme einer Stoßionisation ausgeht und den Durchschlag ganz analog zu dem in Luft annimmt. Die Anzahl der Ionen, die ein wanderndes Ion auf der Längeneinheit erzeugt, soll dem Überwert der Feldstärke über eine minimale kritische Feldstärke proportional sein. Daraus läßt sich dann obige Beziehung ableiten.

Auch die im vorigen Abschnitt genannte Gleichung

$$\mathfrak{E}_D = a + \frac{b}{\sqrt{r}}$$

erklärt Peek durch die Annahme, daß die Durchschlagsfeldstärke nicht nur dicht an der Elektrode, sondern längs einer bestimmten Strecke vorhanden sein muß. Diese Strecke soll nun umgekehrt proportional sein der Wurzel aus dem Krümmungsradius. So wird es verständlich, daß die maximale Feldstärke mit abnehmendem $\sqrt{r}$ zunehmen muß.

Die Ionisationstheorie erklärt auch die Tatsache, daß die Verzögerung mit zunehmender Spannung abnimmt. Darauf soll in Abschnitt 8 eingegangen werden.

6. Elektrodenbeschaffenheit.

Die Beschaffenheit der Elektrodenoberfläche kommt in dreierlei Hinsicht in Frage.

1. Das Elektrodenmetall in chemischer Hinsicht.

2. Die Beschaffenheit (Rauhigkeit) der Oberfläche in physikalischer Hinsicht, sowie der Gehalt der Elektroden an Gas.

3. Das Vorzeichen der Ladung der Elektrode.

Alle drei Umstände sprechen dafür, daß der Elektrode beim Flüssigkeitsdurchschlag eine sehr wesentliche Bedeutung zukommt, teils im Gegensatz zu ihrem Verhalten bei gasförmigen Isolatoren. Diesem Sachverhalt versucht Verf. in einer Theorie gerecht zu werden, die wir weiter unten noch kurz beschreiben wollen.

Was zunächst den ersten Punkt betrifft, so ist gerade nach den Erfahrungen an Gasen ein Einfluß des Elektrodenmetalles an und für sich nicht zu erwarten. Es besteht auch in der Hauptsache nur die Untersuchung von Sorge (6) (sowie neuerdings die von A. Nikuradse (34)) über diesen Punkt, obwohl es sich außerordentlich lohnen würde, diesem Einfluß weiter nachzuforschen. Sorge hat jedenfalls eine Reihe gefunden, welche nach zunehmender Festigkeit folgendermaßen lautet.

Eisen < Messing < Blei < Kupfer < Aluminium < Gold < Zink < Silber.

Die gleiche Reihe gilt für Benzin, Hexan und Xylol. Der Unterschied zwischen Eisen und Silber beträgt etwa 25 Proz., ist also recht ausgeprägt. Sorge bemerkt, daß mit gewissen Ausnahmen die Wärmeleitfähigkeit in derselben Reihenfolge wächst; das würde demnach für die thermische Natur des Durchschlages sprechen. In derselben Reihenfolge wächst auch — wenn auch nur in grober Annäherung — die Edelkeit der Metalle (Zink?). Das Zahlenergebnis gibt folgende Tabelle (in kV/cm).

	Eisen	Messing	Blei	Kupfer	Aluminium	Gold	Zink	Silber
Benzin	400	420	435	455	450	—	490	—
Hexan	355	370	380	435	440	430	475	480
Xylol	430	410	465	470	480	485	515	535

Nikuradse findet, daß das Elektrodenmetall für die Spitzenströme unter Öl ebenfalls von Einfluß ist.

Zweitens spielt, wie gesagt, die Elektrodenoberfläche physikalisch eine Rolle. Allerdings sind hier eine Anzahl von Momenten nicht gut zu trennen. Teilweise beruht das Wesen der Vorbehandlung der Elektrode auf der Abschleifung von kleinsten Spitzen und Schrammen, teilweise auf der Entfernung von Flüssigkeitsresten und teilweise in der Entfernung von Gasresten. Alle diese Umstände werden durch die gemeinschaftliche „Vorbehandlung" der Elektroden festgelegt und lassen sich nur schwer voneinander trennen. Je sorgfältiger die Vorbehandlung ist, um so günstiger sind diese Verhältnisse an der Elektrode und um so höher die Durchschlagsfestigkeit.

Hierüber bestehen auch verschiedene experimentelle Angaben. So hat Sorge folgende Ergebnisse erzielt:

Vorbehandlungsart:	Elektrode ungeputzt	Elektrode mit Fettschicht bedeckt	Elektrode mit Karborundpapier abgeschmirgelt	Elektrode mit Putzpomade und Benzin gesäubert
Durchschlagsfeldstärke in kV/cm	380	390	370	400

Die Unterschiede sind verhältnismäßig klein. Das Abschmirgeln war scheinbar ungünstig, da künstlich Schrammen erzeugt worden sind.

Interessant sind diesbezügliche Untersuchungen von V. Engelhardt (35), der es insbesondere unternahm, eine Trocknung der Elektroden vorzunehmen, wobei sich bedeutende Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit ergibt. Nur läßt sich hier nicht entscheiden, wie weit Flüssigkeit- und wieweit Gasentfernung wirksam gewesen sind.

Vorbehandlungsart:	Elektroden unter Öl mit Leder abgerieben	Reinigung mit Benzin u. Trockn. an der Luft	Reinigung i. Benzol, dann heißer Luftstr. 1—2 Minuten	Reinigung i. Benzol, d. elektrischer Ofen bei 110°, 1/2 Stunde
Durchschlagsfeldstärke in kV/cm	200	240	335	355

Die Vorbehandlung bei höherer Temperatur läßt also die Durchschlagsfeldstärke besonders ansteigen.

Versuche, bei welcher die Elektroden im Vakuum vorbehandelt, oder sogar regelrecht entgast waren, sind im Zusammenhang mit dem Durchschlag flüssiger Dielektriken dem Verf. in der Literatur nicht bekannt. Bei der Untersuchung fester Dielektriken wurde der Einfluß des Evakuierens öfters festgestellt. Daß es auch bei Flüssigkeiten sehr darauf ankommt, beweisen übrigens auch die Arbeiten von Schröter (10), wo die Elektroden vorher in der Bunsenflamme behandelt werden und insbesondere von Friese (13), der die Elektroden vorher im Vakuum erhitzte.

Durch freundliche Mitteilung sind ferner dem Verf. noch unveröffentlichte, unter H. Gerdien im Forschungslabor. der Siemens-Schuckertwerke ausgeführte Versuche bekannt geworden, wo die Durchschlagsfestigkeit von reinstem Benzol nach vorheriger Evakuierung der Elektroden im Hochvakuum gemessen wurde. Es ergab sich ein ständiges Ansteigen derselben mit zunehmender Evakuierungsdauer bis zur Größenordnung von 600 kV/cm.

An dieser Stelle dürfte es wohl angebracht sein, auf eine vom Verf. (36) entwickelte Theorie über den Durchschlag flüssiger Dielektriken einzugehen, da sie gerade die Gasreste, die an der Elektrodenoberfläche stets vorhanden sind, für den Durchschlag verantwortlich macht. Es kommen natürlich auch Gasreste in Frage, die innerhalb des Dielektrikums zurückgeblieben sind. Solche Gasreste werden aber eher in einer Kabelisolation vorhanden sein, bei homogenen Flüssigkeiten weniger. Hier wollen wir uns daher zunächst auf die Gasschicht beschränken, die an der Metalloberfläche adsorbiert ist.

Erreicht das elektrische Feld an der Elektrode die Höhe von etwa 100 kV/cm, so schlägt die Luftschicht durch und wird leitend. Man hat dann sozusagen eine bewegliche Haut, die am Metall sitzt. Sie wird bestrebt sein, sich an Stelle der höchsten Feldstärke anzusammeln. Man kann der Einfachheit halber annehmen, daß sich an dieser Stelle eine mikroskopisch kleine (Durchmesser 10^{-4}—10^{-3} cm) Gashalbkugel ansammeln wird. Da sie dieselbe Ladung trägt, wie die entsprechende Elektrode, so besteht die Tendenz, daß sie abgestoßen wird. Dies ist aber dadurch erschwert, daß sie an der Elektrode haftet und so wird sie sich zunächst in Richtung des Feldes strecken. Ist die Flüssigkeit genügend viskös, wie z. B. Öle sind, dann bleibt die gestreckte Figur infolge der Langsamkeit der Flüssigkeitsströmungen bestehen und da die Streckung immer weiter zunimmt, so bildet sich schließlich ein Kanal, in welchem der Luftdurchschlag stattfindet.

Man sieht, daß der Grundgedanke der ist, daß gewissermaßen die Korona unter Öl bestrebt ist, das mechanische Hindernis, das die Flüssigkeit bietet, zu überbrücken, und daß dieses bei Erreichen einer bestimmten Feldstärke auch gelingen wird.

Ist die Flüssigkeit mehr fluid, wie z. B. Benzol und ähnliches, dann wird es leicht geschehen, daß die gestreckte Figur plötzlich doch von der Elektrode losgelöst wird und auf diese Weise zu einer Vorentladung Anlaß gibt. Der Durchschlag kann nur so zustande kommen, wenn sich die Gasblase während der Streckung nicht zu sehr verjüngt und dies ist wieder nur so möglich, wenn sie sich

gleichzeitig im Volumen ausdehnt. Diese Ausdehnung entspricht also gewissermaßen dem Vorgang, als ob die Glimmentladung in die flüssige Masse einen Keil schlagen würde, die Flüssigkeit muß ein wenig nach der Seite geschoben werden, wobei offenbar auch der äußere Druck überwunden werden muß.

Dies sind die Grundgedanken der Theorie. Mathematisch kann man sie nur teilweise exakt fassen, teilweise ist sie empirisch zu ergänzen. Man erhält jedenfalls folgende Gleichung:

$$\mathfrak{E}_D = \sqrt{\frac{\gamma}{a} + \frac{k}{\eta} p} \text{ kV/cm}$$

wo γ die Oberflächenspannung der Flüssigkeit in dyn/cm, a den Radius der Gasblase in cm, p der äußere Druck, η die Viskosität und k eine Konstante sind. Letztere läßt sich leider theoretisch noch nicht ableiten.

Bei Atmosphärendruck tritt das zweite Glied an Bedeutung etwas zurück. Setzt man dann $\gamma \sim 30$ und $a \sim 10^{-3}$, so wird $\mathfrak{E}_D \sim 170$, also von der richtigen Größenordnung. Da γ für die meisten Flüssigkeiten nahezu um 30 herum liegt, so ist der im ersten Abschnitt genannte Satz, wonach die Durchschlagsfestigkeit nicht allzusehr von der chemischen Natur abhängt, verständlich. Je mehr die Elektroden entgast sind, um so kleiner ist a, $\mathfrak{E}_D$ wächst dann mit der Quadratwurzel von $\frac{1}{a}$.

Da η im Nenner ist, ersehen wir auch, daß Öle im allgemeinen eine etwas geringere Festigkeit haben, als leichtbewegliche organische Flüssigkeiten, worauf im ersten Abschnitt ebenfalls hingewiesen wurde. Die Gleichung gestattet in einigen Fällen den Temperatur- und Druckgang der Durchschlagsfestigkeit wiederzugeben, worauf im 9. und 10. Abschnitt eingegangen werden soll.

Aus dieser Darstellung ist jedenfalls ersichtlich, daß neben einer Ionisation in der Flüssigkeit selbst, wie sie etwa Peek annimmt, auch mit der Ionisation der an der Elektrode haftenden Gasschicht und mit den mechanischen Folgeerscheinungen dieser Glimmentladung zu rechnen ist.

Die dritte Frage ist der Einfluß des Vorzeichens der Ladung. Sie kann nur so untersucht werden, wenn man die Anordnung unsymmetrisch baut; die beste Methode ist Spitze gegen Platte. Dann kann man bei Anlegung von Gleichspannung feststellen, welche Durchschlagsspannung größer ist; die bei positiver oder negativer Spitze. Man hat bis jetzt die Frage dahin beantwortet, daß die negative Spitze höhere Durchschlagsspannungen aufweist, etwa so wie bei Gasen.

Sorge nahm als Spitze einen Konus von 40° Öffnungswinkel und einem Krümmungsradius von 0,5 mm, als Platte eine Kalotte von 20 mm Durchmesser und 50 mm Krümmungsradius. Hexan ergab bei einem Abstand von 0,5 mm bei positiver Spitze 240 kV/cm, bei negativer 243 kV/cm, also keine Polaritätserscheinung. Ebenso Transformatorenöl bei einem Abstand von 1,5 mm, falls die Spannungssteigerung 3 kV/min betrug; positive Spitze: 128 kV/cm, negative Spitze: 131 kV/cm. Dagegen erhält er für eine Steigerung von 30 kV/min, bei positiver Spitze 195, und bei negativer 224 kV/cm.

Spath hat auch einen solchen Effekt gefunden, sogar in stärkerem Maße als Sorge, bei einem Abstand von etwa 3 mm. Es hat also den Anschein, als ob Polaritätseffekte nur bei höherer Entfernung auftreten.

Ähnliche Ergebnisse hat Nikuradse unter Schumann in seiner noch nicht veröffentlichten Untersuchung (s. Abschn. 7) erzielt. Die Werte bei positiver Spitze sind leichter reproduzierbar, und liegen an und für sich niedriger als die bei negativer Spitze.

Ausführlich hat die Verhältnisse E. Marx (37) untersucht und ebenfalls höhere negative Werte erhalten. Er dehnte seine Versuche auch auf Stoßspannungen aus, deren Dauer durch Abänderung des Parallelwiderstandes zum Prüfobjekt verändert wurde. Je länger die Stoßspannung andauert, um so auffälliger ist der Polaritätseffekt, so insbesondere bei Wasser.

Diese Erscheinungen deuten darauf hin, daß an den Elektroden Ionisationserscheinungen mitspielen müssen.

7. Leitwert.

Der Leitwert, den alle Isolatoren und so auch flüssige Dielektrika besitzen, kann in zweierlei Hinsicht im Zusammenhang mit der elektrischen Festigkeit untersucht werden. Die beiden Fragen stehen natürlich in gewissem Zusammenhange miteinander.

Die eine lautet ähnlich den bisherigen Fragestellungen: Welchen Einfluß hat der Leitwert einer Flüssigkeit auf ihre Durchschlagsfestigkeit? Der Leitwert kann an und für sich, der chemischen Natur nach verschieden sein, er kann auch durch Wassergehalt verursacht sein und endlich künstlich durch gewisse Zusätze hervorgerufen werden. Bei allen diesen Arten kann man fragen, ob ein deutlicher Parallelismus zwischen ihm und der Durchschlagsfestigkeit vorhanden ist, und wenn ja, wie der Zusammenhang lautet. Systematische experimentelle Untersuchungen in dieser Richtung liegen bis jetzt nicht vor.

Folgendes kann man aber doch sagen:

1. Im allgemeinen nimmt die Durchschlagsfestigkeit mit zunehmendem Leitwert ab.

2. Diese Abnahme ist aber verhältnismäßig klein; es hat den Anschein, als ob sie etwa von der Form

$$\mathfrak{E}_D = a - b \ln \lambda$$

wäre (λ = Leitwert, a, b = Konstanten).

An Experimentellem liegt wie gesagt, wenig über diese Frage vor. Frühere Autoren erhielten in dieser Hinsicht negative Ergebnisse. I. Almy (38) befolgte die experimentelle Methode der künstlichen Leitfähigkeitserhöhung, indem er Anilin zu Xylol hinzufügte. Er fand dabei keine Veränderung der Festigkeit. F. Kock (39) fand auch keinen Zusammenhang zwischen dem Leitwert von Ölen und ihrer Festigkeit. Ebenso negativ verliefen diesbezügliche Versuche von Dräger (11). Er fügte der Reihe nach Kalziumchlorid, Magnesiumoxyd, Phosphorpentoxyd sowie Ferrozyankalium zu Transformatorenöl hinzu, filtrierte ab und bestimmte die Durchschlagsfestigkeit. Es wies keine nennenswerte Änderung auf; allerdings sind gerade diese Stoffe wegen ihrer Unlöslichkeit in Öl nicht allzu geeignet für diese Entscheidung.

Andere Autoren konnten dann solchen Zusammenhang feststellen. Verf. (40) untersuchte Benzol ohne und mit Pikrinsäurezusatz und fand, daß bei einer Leitwertszunahme von 1:10 die Festigkeit nur um 20 Proz. abnahm.

Konzentration der Säure in Molarität	Leitwert in relat. Einheit	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm Mittelwert
0	2,0	230
10^{-2}	21	185

Zu ähnlichem Ergebnis kommt Y. Toriyama (28), der den Leitwert bei verschieden getrockneten Ölen maß und mit der Durchschlagsfeldstärke verglich. Hier ist auch die Änderung des Leitwertes viel größer als die der Festigkeit. Folgende Tabelle gibt einen Auszug seiner Messungen:

Reinigungsart	Leitwert in 10^{-13} S/cm bei 30 kV/cm	150	200	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm
Papierfilter	525	—	—	90
Papierfilter, dann gekocht	0,7	2,8	8	320
Papierfilter, dann gekocht, dann Porzellanfilter	0,7	1,0	2,5	470

Einen gewissen Einblick, wenn auch keinen einwandfreien, gewährt die Messung der Durchschlagsfestigkeit und des Leitwertes bei verschiedenen Temperaturen. Die Festigkeit kann nämlich auch durch die Temperatur allein beeinflußt werden (s. Abschn. 9), und deshalb sind die Schlüsse nicht so bindend. Allerdings sind die Änderungen des Leitwertes so gewaltig und die der Festigkeit so gering, daß dieses negative Ergebnis als äußerst wertvoll zu betrachten ist. Wir geben eine kleine Tabelle aus der Drägerschen Arbeit, in welcher die Zusammenhänge dargestellt sind.

Temperatur	Leitwert in 10^{-11} S/cm	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm
20°C	5	295
40	30	320
60	90	355
80	190	380
100	360	385
120	490	375

Diese Zahlen sprechen sehr deutlich im obigen Sinne, indem die Durchschlagsfestigkeit von 20 bis 80° sogar steigt (und zwar, wie wir sehen werden, wegen Abnahme der Viskosität), obwohl der Leitwert in so starkem Maße zunimmt. Einen ähnlichen Zusammenhang betrachtet Toriyama in seiner Arbeit, auf dessen Wiedergabe, da er dem vorigen sehr ähnlich, verzichtet werden kann.

Die zweite Frage, die in diesem Zusammenhange interessiert, ist die Beziehung zwischen Feldstärke und Leitwert überhaupt. Steht man auf dem Standpunkt, daß der Strom beim Steigern der Spannung allmählich steigt und stetig bis zum Durchschlagsstrom anwächst, so ist die Frage nach der Art der Leitwertserhöhung mit steigernder Spannung von besonderer Bedeutung. Die Stromspannungs-Charakteristik ist dann sogar imstande, den Schlüssel zum Verständnis des Durchbruchsmechanismus zu liefern (etwa im Sinne von Peek, siehe nächsten Abschnitt).

Steht man dagegen nicht auf dieser Grundlage, sondern faßt den Durchschlag unabhängig vom Stromdurchgang auf, dann interessiert es immer noch, wie der Leitwert mit der Feldstärke steigt. Denn wenn der Leitwert überhaupt einen gewissen Einfluß auf die Festigkeit hat, so ist eben rechtgemäß nicht der Leitwert bei kleinen, sondern der bei hohen Feldstärken in Betracht zu ziehen. Die Frage bleibt also auf jeden Fall wichtig.

Dräger (11) hat in seiner Arbeit diesen Punkt experimentell angegriffen, jedoch nicht sehr eindeutige Ergebnisse erzielt. Im allgemeinen findet er, daß bis zu Feldstärken von 18 kV/cm ungereinigte Öle ein Anwachsen des Leitwertes mit der Spannung zeigen, wogegen bei reinen Ölen der Leitwert ziemlich konstant ist. Einige seiner Zahlen zeigt folgende Tabelle.

Feldstärke	Leitwert in 10^{-12} S/cm			
	Öl 1 unger.	Öl 1 ger.	Öl 2 unger.	Öl 2 ger.
1 kV/cm	0,4	0,25	0,25	0,50
2	0,35	0,20	0,25	0,50
4	0,35	0,15	0,30	0,50
6	0,45	0,15	0,30	0,50
10	0,7	0,15	0,35	0,50
14	0,8	0,10	—	0,50
18	—	0,10	—	0,50

Sehr ausführlich hat Toriyama Stromspannungskurven an Ölen aufgenommen. Er kommt im allgemeinen zum Ergebnis, daß der Strom anfangs langsam, dann schneller steigt, endlich sehr steil in den Durchschlagsstrom übergeht. Man hat aus den Kurven einigermaßen den Eindruck, als ob der Strom den Durchschlag herbeiführen würde, obwohl natürlich solch ein Schluß nicht bindend ist. Einige seiner Zahlen lauten folgendermaßen:

Spannung in kV	Strom in 10^{-8} Amp.		
	Elektr. Abst. 10 mm	3 mm	1 mm
4	1	4	6
8	2	7	24
12	4	12	90
16	5	19	—
20	6	30	—
24	7	46	—
28	9	70	—
32	10	105	—

Die Kurven verlaufen anfangs linear und weiterhin stärker ansteigend.

Eine ähnliche Untersuchung wurde von A. Nikuradse (34) im Schumannschen Institut ausgeführt. Er arbeitete mit der Anordnung Spitze gegen Platte und erhielt ähnliche Kurven. Die Untersuchung wurde inzwischen auf höhere Temperaturen ausgedehnt und die Ergebnisse hat Herr Schumann dem Verfasser noch vor der Veröffentlichung freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Bemerkenswert ist die Polaritätswirkung, die bei diesen Versuchen zutage tritt. Bei negativer Spitze waren die Ströme weniger gut reproduzierbar, die Spitze verhielt sich empfindlicher, als bei positiver Ladung derselben. Der Polaritätsunterschied war ziemlich temperaturunabhängig.

Alle Stromspannungskurven sind druckunabhängig.

Eine der vorigen analoge Tabelle sei auch aus der Schumannschen Untersuchung mitgeteilt. Die Elektrodenanordnung war hier Platte gegen Platte.

Spannung in kV	Strom in 10^{-9} Amp.		
	Abstand 12 mm	5 mm	2 mm
4	0,3	1,0	1,5
8	0,7	1,8	2,7
12	1,3	2,6	4,2
16	2,1	3,9	6,5
20	3,0	5,5	9,1

Die Kurven verlaufen geradliniger als die von Toriyama, dafür ist aber die obere Spannungsgrenze niedriger, so daß das nichtlineare Gebiet erst folgen würde.

Aus der Tatsache, daß das Verhalten der Stromspannungscharakteristiken in vieler Beziehung (Polarität, Einfluß der Feuchtigkeit und des Elektrodenmaterials) dem Verhalten der Durchschlagsfestigkeit ähnlich ist, folgert Nikuradse, daß, wenn auch nicht die Anzahl der Ionen, also der Leitwert der Flüssigkeit, so doch die Eigenschaften der Ionen (Beweglichkeit usw.) für den Durchschlag maßgebend seien.

Bekanntlich hat M. Wien (3) nachgewiesen, daß auch in wäßrigen Lösungen der Leitwert mit der Feldstärke ansteigt. Und Verf. (41) hat gezeigt, daß in sehr schlecht leitenden benzolischen Lösungen, die schon als Halbleiter zu bezeichnen sind, ähnliche Verhältnisse vorliegen. Nun ist es wahrscheinlich, daß diese Fälle nichts mit den obigen Befunden an Transformatorenöl gemeinsam haben. Denn in den Lösungen handelt es sich stets um Ionen, die in der flüssigen Phase schon vorhanden sind, während bei den Ölen ein Hinzutreten neuer Ionen von den Elektroden her durchaus möglich ist. Entschieden ist aber diese Frage noch nicht, und es ist nicht ausgeschlossen, daß sich beide Effekte als identisch erweisen.

Auf jeden Fall möge aus der soeben zitierten Arbeit des Verf. ein tabellarischer Auszug zweier Versuchsreihen folgen (Elektrodenabstand: 6 mm).

Spannung in kV	Strom in 10^{-6} Amp.	
	Lösung 1	Lösung 2
4,0	1,5	25
6,5	2,5	40
12,5	5,5	85
17,0	8,0	125
21,0	11,0	170
25,0	14,5	220
29,5	18,0	270

In allen diesen Fällen, auch in den vorigen, kann man die Befunde durch eine Gleichung von der Form

$$I = aV + bV^2$$

wiedergeben. Die Leitfähigkeit I/V ist jedenfalls bis etwa 40 kV/cm eine lineare Funktion der Spannung. Besonders die Kurven von Toriyama sind denen des Verf. an benzolischen Lösungen durchaus ähnlich.

Unter der Annahme, daß die neuen Ionen von der Elektrode gebildet werden, konnte Verf. (40) für die Größe b obiger Gleichung folgenden Ausdruck ableiten.

$$b = \frac{\varepsilon(\sigma + \nu\sigma')\alpha^3(1-\nu)^2}{\pi\left(\sqrt{1+2\alpha(1-\nu)\vartheta^2}-1\right)^2}$$

wo

$$\nu = \frac{\beta(1+2\alpha\vartheta)}{\alpha(1+2\beta\vartheta)}$$

wo ε = Dielektrizitätskonstante, σ, σ' = Beweglichkeit des Kations und Anions, α und β Proportionalitätsfaktoren zwischen Raumladung und Feldstärke an der Elektrode für das Kation und Anion, ϑ = Elektrodenabstand. Nur die Konstanten α und β sind unbekannt, sie drücken die Stärke der Tendenz zur Raumladungsbildung der beiden Ionen aus. Die Gleichung ließe sich an dem Versuchsmaterial von Toriyama (Zusammenhang zwischen b und ϑ) teilweise prüfen.

Eine wichtige experimentelle Untersuchung in dieser Richtung liegt von L. S. Ornstein, G. J. D. J. Willemse und J. H. G. Mulders (42) vor. Die gewöhnlichen Verluste in Ölen erwiesen sich zunächst als elektrolytische Leitungsverluste. Durch Stromreinigung „stabilisierte" Öle zeigten dann deutlich die Wirkung von Lufteinschlüssen. Die Verluste waren frequenzabhängig. Zunahme der Verluste mit der Spannung verschwand nach Entlüften des Öles. Dies spricht auch im Sinne einer Leitwertserhöhung durch Ionisation.

Aber es sei nochmals betont, daß möglicherweise auch in Ölen die schon vorhandenen Ionen den Feldeffekt geben könnten. Über den eigentlichen Mechanismus des Effekts in echten Lösungen ist auch noch einiges ungeklärt, wenn er auch in wäßrigen Lösungen mit Sicherheit auf den elektrostatischen Debye-Effekt zurückgeführt werden konnte.

Zusammenfassend läßt sich also sagen, daß zwar die Leitungsströme vor dem Durchschlag mit steigender Spannung stark anwachsen, daß aber der Durchschlag höchstwahrscheinlich nicht durch den Strom bedingt ist, da Leitwert und Durchschlagsfeldstärke nur in sehr losem Zusammenhange stehen.

Demgegenüber behauptet die Theorie von A. Güntherschulze (43), daß der Leitungsstrom unmittelbar mit dem Durchschlag zusammenhängt. Die Ionen erzeugen bei ihrer Bewegung Wärme und starke lokale Temperaturerhöhung. Derzufolge tritt lokal Verdampfung und Bildung von Gasbläschen ein, in welchen dann ebenso wie in Gasen der Durchschlag durch Stoßionisation zustande kommt.

Die Durchschlagsfestigkeit hängt demnach von der Ionenbeweglichkeit und von der gesamten Verdampfungswärme der Flüssigkeit in bestimmter Weise ab, sofern es auf die Bildung der Gasblasen ankommt. Außerdem müssen alle Faktoren von Einfluß sein, die den Luftdurchschlag beeinträchtigen, da der eigentliche Durchschlag in der Gasphase zustande kommt. Als solcher kommt in erster Linie der äußere Druck in Betracht, da mit dessen Zunahme die mittlere Weglänge und die zur Ionisation verwendbare Energie der Ionen abnimmt.

An dieser Stelle sei kurz auch die Theorie von P. Böning (44) erwähnt, nach welcher sich im Öl in Richtung des Feldes stets Wasserkanäle bilden. An der Grenze dieser Kanäle befinden sich unbewegliche adsorbierte Ionen, welche nun bei einer bestimmten Feldstärke losgerissen werden und durch Wärme- und Gasentwicklung zum Durchschlag führen. Diese Theorie ist aus zwei Gründen unhaltbar. 1. Eine getrennte Wasserphase ist nur in stark feuchten Ölen vorhanden (s. Abschn. 2), sonst sind die Wassermolekeln in echter Lösung vorhanden. 2. Der Begriff des unbeweglichen adsorbierten Ions ist ein physikalisch-chemisch unbegründeter und eine reine Schreibtischhypothese. Im Gegenteil ist es durch viele Arbeiten von Volmer bekannt, daß adsorbierte Ionen tangential zur Phasengrenze eine sehr hohe Beweglichkeit haben.

Um auf die Theorie von Güntherschulze zurückzukommen, so werden durch sie viele Erscheinungen, wenn auch nur qualitativ, erklärt. Daß der Leitwert auf die Durchschlagsfestigkeit keinen Einfluß hat, erklärt Güntherschulze damit, daß es auf die vom einzelnen Ion erzeugte lokale Wärmemenge ankommt, und daß die Anzahl dieser Wärmezentren, solange sie nicht zu groß wird, nicht sehr wesentlich ist. Eine quantitative Ausarbeitung der Theorie fehlt noch. Es ist bemerkenswert, daß zwischen dieser Theorie und jener des Verf. insofern ein Berührungspunkt besteht, als beide von dem Durchschlag in der Gasphase ausgehen. Obwohl der Mechanismus bei beiden verschieden angenommen wird, so ist es nicht unmöglich, daß eine Verschmelzung der beiden vorgenommen werden kann.

So haben die schon erwähnten Versuche von Schumann ihn dazu geführt, daß auch er der Elektrodenoberfläche eine besondere Bedeutung beimißt. Um diese Tatsache mit dem Güntherschulzeschen Ansatz in Einklang zu bringen, hat H. Edler als Mitarbeiter von Fajans die Zusatzhypothese entwickelt, daß die Verdampfung der Flüssigkeit im Inneren infolge Siedeverzuges nicht zustande kommt, wohl aber an den Elek-

troden. Auf diese Weise wäre der starke Elektrodeneinfluß erklärlich. (Insbesondere der der Wärmeleitfähigkeit des Metalles). Gleichzeitig steht diese Annahme mit der Anschauung von Hayden und Eddy (15) in Einklang, denn durch den Siedeverzug ist das Wahrscheinlichkeitsmoment gegeben, welches ihrer Ansicht nach die Streuung bewirken soll.

Solange nichts Näheres über diese Theorie bekannt ist, läßt sich schwer Stellung dazu nehmen. Es ist aber denkbar, daß auf diese Weise Gasblasen an den Elektroden frei werden, welche dann im vom Verf. entwickelten Sinne zum Durchschlag führen.

8. Zeitliche Vorgänge.

Die in diesem Abschnitt zu behandelnden Einflüsse lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Einerseits handelt es sich um die Frage, ob die Beanspruchungsdauer die Durchschlagsfestigkeit beeinflußt, anderseits darum, ob die Form der Spannungskurve einen dahingehenden Einfluß hat. Beide Fragen können bejaht werden und sind auch experimentell teilweise geklärt.

Theoretisch dagegen ist dieses Kapitel noch kaum behandelt. Die Theorie, welche auch zeitliche Vorgänge genau wiedergibt, müßte schon sehr weit gediehen sein.

Betrachten wir zuerst die Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit von der Dauer der Beanspruchung.

Whitehead (18) teilt Kurven mit, welche diese Frage zu beanworten gestatten. In logarithmischer Zeichnung hat man zwischen Spannung und Zeitdauer t angenähert eine Gerade.

Im folgenden geben wir einige Zahlen wieder:

Reines Öl bei 14° C		Reines Öl bei 40° C	
t in Sek.	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm	t in Sek.	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm
30	160	20	150
50	135	350	130
100	120	2800	120
250	105	7000	110
350	90		
1400	80		

Eine ähnliche von Flight (7) herrührende Kurve (mit einer Nadelfunkenstrecke ausgeführt):

t in Sek.	kV/cm max.
10	17,0
20	16,3
40	15,6
80	14,9
160	14,4

Aus diesen Kurven ist ersichtlich, daß mit steigender Dauer die Spannung kontinuierlich abnimmt. Was auffallend ist, ist das Fehlen irgendeines Grenzwertes. Aus diesen Kurven hätte es den Anschein, als ob es überhaupt nicht möglich wäre, eine Durchschlagsfestigkeit anzugeben, da sie stetig mit der Dauer variiert. Dies ist zwar an und für sich richtig, praktisch dagegen nicht. Denn es ist erwiesen, daß eine Dauer von etwa einer Minute zu einem gewissen Grenzwert führt (sog. Minutenfestigkeit). Trägt man die Zeit als Abszisse auf, und die Durchschlagsfeldstärke als Ordinate, so hat man etwa folgende Kurve zu erwarten (verzerrt gezeichnet) (Abb. 1). Der erste Teil, der sich etwa bis zu einer Sekunde

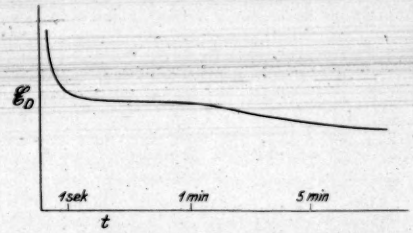


Fig. 1. Abhängigkeit der Durchschlagsfeldstärke von der Belastungszeit (Abszisse in gedrängtem Maß).

erstreckt, ist verhältnismäßig steil, darauf folgt ein annähernd konstantes Gebiet, welches in gewissem Sinne als die „richtige" Durchschlagsfeldstärke zu bezeichnen ist; nach etwa einer Minute folgt dann ein langsames Abnehmen. In den beiden amerikanischen Arbeiten kommt dies nicht zur Geltung, man sieht dort hauptsächlich nur den zweiten Teil der Gesamtkurve.

Der erste Teil in unserer allgemeinen Kurve rührt davon her, daß die Ausbildung des Durchschlagsmechanismus eine gewisse Zeit erfordert. Es handelt sich hierbei um die Größenordnung von etwa einer Sekunde. Weiter unten werden wir für diese Trägheit des Durchschlagsvorganges noch weitere Beweise bringen. Unterschreitet die Dauer die von einer Sekunde, so ist aus diesem Grunde eine höhere Spannung erforderlich, die Durchschlagsfeldstärke steigt. Überschreitet dagegen die Dauer die von etwa einer Sekunde, so fällt die Trägheitswirkung fort und man mißt die richtige Durchschlagsspannung.

Nimmt dann die Dauer noch mehr zu, so kommt offenbar ein zweites Moment hinzu, welches eben die weitere kontinuierliche Abnahme bewirkt. Und zwar sind das sekundäre Veränderungen, die eintreten. Höchstwahrscheinlich sind es bei Flüssigkeiten Verunreinigungen, die infolge ihrer höheren Dielektrizitätskonstante allmählich

in das Feld hineingezogen werden und so die Durchschlagsfestigkeit herabsetzen. Oder es wird durch die hohe Spannung Gas frei (z. B. das von den Elektroden absorbierte Gas). Oder es treten lokale Erhitzungen mit Veränderung des Dielektrikums auf. Jedenfalls wird der ursprüngliche Zustand verändert und man bekommt um so geringere Festigkeiten, je länger man beansprucht. Diese zu langen Zeiten sind demnach auch nicht maßgebend und man vermeidet sie besser bei den Messungen.

Dieser Sachverhalt wird auch noch in anderer Weise klar. Man kann nämlich die angelegte Spannung mit immer steigender Geschwindigkeit erhöhen und muß dann den vorigen etwas analoges bekommen. In der Tat wird die Durchschlagsfeldstärke fallen, wenn man zu langsam steigert, etwa unter 10 kV/min. Darüber hinaus erhält man eher den „richtigen" Grenzwert. Zu schnelle Steigerung (über 60 kV/min) ist auch nicht geboten, damit man nicht Spannungserhöhung wegen Trägheit bekommt. Plötzliches Einschalten der Spannung ist schon wegen etwaiger Überspannungen ein unsicheres Verfahren.

Es sei z. B. eine Versuchsreihe von J. Sorge (6) mitgeteilt, um den Einfluß der Steigerungsgeschwindigkeit zu zeigen. Man sieht hier wiederum nur den zweiten Teil unserer allgemeinen Kurve.

Geschwindigk. in kV/min	Xylol	Hexan	Benzin	Öl
1,4	390	370	—	250
6,3	—	370	360	280
12,5	500	370	370	280
30	500	—	380	290
46	500	370	380	290
63	500	—	380	290
78	500	370	—	—

Ganz ähnliche Messungen liegen auch von Toriyama (28) vor, so daß man wohl als begründet ansehen kann, bei der Messung die Spannung um etwa 30—60 kV/min zu steigern.

Geschwindigkeit in kV/min	Öl 1 kV/cm	Öl 2 kV/cm
1,5	400	360
5	440	410
15	460	480
50	490	520

Der Grenzwert ist hier wiederum nicht so deutlich, wie bei Sorge, die Kurven passen sich eher den zitierten englischen Befunden an.

Übrigens sei erwähnt, daß die hier entwickelte Ansicht bezüglich der sekundären Veränderungen nicht von allen geteilt wird. So ist Peek, der Vertreter der Stoßionisationstheorie, der Ansicht, daß infolge Langsamkeit der Vorgänge die Entwicklung der Ströme eine gewisse Zeit braucht. Er setzt die Gleichungen für den Strom an und berechnet die Zeit, die erforderlich ist, bis der Strom auf 0,1 Amp. gestiegen ist. Dieser Wert wird als Durchschlagsstrom betrachtet. Die theoretische Zeitspannungskurve ist jedenfalls den mitgeteilten Kurven der Electrical Research Association durchaus ähnlich.

Der erste Teil der allgemeinen Kurve zeigt sich, wenn man die zeitlichen Vorgänge unter einer Sekunde betrachtet. Am besten eignet sich hierfür die Betrachtung des Einflusses der Frequenz sowie der Kurvenform auf die Durchschlagsfestigkeit. Vergleicht man Wechselspannungen verschiedener Frequenz sowie Gleichspannung, so findet man wachsende Durchschlagsfestigkeit mit steigender Frequenz. Dieses Verhalten ist insofern bemerkenswert, als es bei festen Isolatoren aus anderen Gründen umgekehrt ist. Hier aber liegt die Ursache deutlich darin, daß bei hoher Frequenz, bei der der Maximalwert jeweils zum Bruchteil einer Sekunde wirksam ist und zudem ihre Richtung fortwährend wechselt, so daß sich manche der Spannungswirkungen stets wieder aufheben müssen, der Durchschlag nicht so leicht zustande kommt. Es muß dann die geringe Zeitdauer durch eine Überspannung kompensiert werden, damit der Durchschlag eintreten kann. Als Beweis sollen einige Versuchsergebnisse mitgeteilt werden. Sorge fand in seiner Arbeit für Hexan folgendes:

Frequenz in Hertz	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm
0 (Gl. Sp.)	305
50	335
500	455

Folgende Tabelle gibt die Befunde von Dräger (11) wieder:

Frequenz in Hertz	Durchschlagsfeldstärke für Öl 1	Öl 2
0	250	—
25	340	—
50	380	460
150	430	540
225	470	570
800	—	610

In ähnlicher Weise äußert sich der Einfluß des Scheitelfaktors. Je größer derselbe, um so spitzer die Kurve, also um so höher die Durchschlagsfeldstärke bei gleichem Maximalwert. Dies soll auch am Material von Dräger gezeigt werden.

Scheitelfaktor	Öl weich filtriert	Öl 1 × hart filtriert	Öl 3 × hart filtriert
1,3	220	310	360
1,5	250	340	390
1,9	270	370	420

Auch eine Versuchsreihe der E. R. A. (18) mag hier folgen. Es handelt sich um ein gereinigtes Öl zwischen Kugelelektroden vom Radius 0,63 cm.

Kurvenform	Elektrodenabstand in mm			
	1,2	2,5	3,0	4,2
	kV/cm	kV/cm	kV/cm	kV/cm
Sinuswelle (Transf.)	130	105	180	155
Spitze Welle (Indukt. Spule)	320	200	200	165

Endlich bleibt die Erörterung von Stoßspannungen. Im Anschluß an das Vorangegangene ist es verständlich, daß dabei die Werte der Durchschlagsfeldstärke noch stärker ansteigen. Von Interesse sind sie aber deshalb, weil die dabei auftretende Spannungserhöhung nur zum Teil auf der Trägheit beruht. Zum andern Teil werden wahrscheinlich ähnliche Momente mitwirken, wie beim Durchschlag ganz dünner Schichten: nämlich Energieverhältnisse. Es ist wahrscheinlich, daß bei Vorgängen, die nach Millionsteln Sekunden zählen, der Durchschlag nicht so sehr von der Feldstärke, als von der zur Verfügung stehenden Energie abhängt.

Hayden und Steinmetz (30) haben eine diesbezügliche Untersuchung ausgeführt und gefunden, daß in der Tat, bei im Verhältnis zur Feldstärke zu geringer Energie die Feldstärke ihre Bedeutung verliert und der Funkenabstand ausschließlich eine Funktion der Energie wird. Empirisch erhielten sie für Kugelelektroden in diesem Gebiet

$$E = 10 d^{3/2}$$

wo E = Energie. Für Nadelelektroden erhielten sie:

$$E = 0{,}24 + 0{,}7 d.$$

Folgende Tabelle gibt die Ergebnisse wieder. Als Maß der Energie diente der Strom, welcher in der Primärwicklung des Transformators floß Die Zahlen geben kV an.

Strom	Kugelelektroden				Nadelelektroden	
	Abstand 0,05 cm	0,1 cm	0,2 cm	0,4 cm	0,05 cm	0,1 cm
(60 Hz)	18	25	32	42	8	18
4 A (Stoß)	30	35	45	60	10	35
2	42	52	68	—	15	65
1	80	—	—	—	20	—

Toriyama hat ebenfalls die Durchschlagsfeldstärke bei Stoßspannungen untersucht. Die Anordnung war die, daß zwei parallele Kondensatoren durch eine Zündfunkenstrecke plötzlich entladen werden. Sind die beiden Kondensatoren durch einen hochohmigen Widerstand verbunden, so befindet sich im Moment der Entladung an den Enden dieses Widerstandes eine kurzdauernde Hochspannung. Aus der Zeitkonstante des Kreises läßt sich die Dauer der Stoßspannung ermitteln. Toriyama berechnet die Zeiten, innerhalb welcher die Spannung nicht mehr als um 1 Proz. gesunken ist. Die Ergebnisse waren folgende:

Stoßdauer in Mikrosekunden	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm
0.3	1050
5.8	950
8.0	900

Es handelt sich also um sehr starkes Ansteigen der Durchschlagsfestigkeit gegenüber den Werten bei Dauerbeanspruchung.

E. Marx (45) hat durch eine ähnliche Anordnung aus festen und flüssigen Stoffen bestehende Serienschaltungen untersucht. Uns interessieren hier einige Ergebnisse bezüglich reiner Flüssigkeiten. Insbesondere untersuchte er Wasser, dessen Leitwert bei so kurzen Beanspruchungen nicht stört. Es ergab sich auch hier, daß Leitwertsänderungen bis zu einer gewissen Grenze ohne Einfluß waren. Man sieht auch hier wiederum wie in Abschn. 2 die schon erwähnte Tatsache, daß Stoßspannung gegenüber Wasser als Isolator aufgefaßt werden kann. Es hatte einen Leitwert von etwa $50 \cdot 10^{-6}$ S/cm. Marx erhielt folgende Zahlen:

Abstand in mm	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm
1	410
2	400
3	350
4	320
5	290

Man sieht, sie sind von derselben Größenordnung wie für organische Flüssigkeiten.

Zum Schluß erwähnen wir Versuche von Dräger, welche darauf hinzielten, diese Zeitabstände, welche bis zum Durchschlag eintreten, oder aber die Spannung selbst durch Bestrahlung mit verschiedenen Strahlenarten herabzusetzen. Die Verhältnisse sind hier natürlich lange nicht so einfach, wie bei Gasen, wo die Verzögerung durch äußere Agenzien glatt aufgehoben werden kann. Hier kann sie nur in gewissem Grade herabgesetzt werden. Er führte seine Versuche mit Ultraviolett-, Röntgen- und Radiumstrahlen aus.

Das Ergebnis der Versuche mit Ultraviolettstrahlen, welche von einer Bogenlampe erzeugt wurden, zeigt folgende Tabelle. Verwendet wurde eine Kugelfunkenstrecke sowie Wechselspannung von 50 Hertz. Wurde die Spannung gleichmäßig gesteigert, so ergaben die bestrahlten Proben geringere Durchschlagsfestigkeiten (in kV/cm).

unbelichtet	belichtet
665 kV/cm	620 kV/cm
630	610
695	665
650	565

Blieb die Feldstärke konstant auf 620 kV/cm, so brauchten die belichteten Proben kürzere Zeit zum Durchschlag.

unbelichtet	belichtet
85 Sek.	14 Sek.
138	23
97	25

Ähnliche Ergebnisse liegen für Röntgenstrahlen vor. Es wurden harte Strahlen verwendet. Die Erzeugung geschah mit 45 kV Gleichspannung. Bei langsamer Steigerung ergaben sich folgende Festigkeiten.

unbelichtet	belichtet
560 kV/cm	525 kV/cm
545	535
600	560

Wurde 530 kV/cm angelegt, so sind die Verzögerungszeiten in Sec.:

unbelichtet	belichtet
284 Sek.	2 Sek.
32	19
31	11

In derselben Weise für Radiumstrahlen:

unbelichtet	belichtet
545 kV/cm	480 kV/cm
570	480
490	430

Und bei konstanter Spannung:

Durchschlagsfestigkeit in kV/cm	unbelichtet	belichtet
460	121 Sek.	30 Sec.
495	48	3

Am wirksamsten scheinen die Radiumstrahlen zu sein.

Wir fassen nochmals das in diesem Abschnitt Gesagte zusammen. Es kommen der Reihe nach drei Gründe für die Erhöhung der Festigkeit mit abnehmender Belastungszeit vor. Der erste Grund kommt für Zeiten über 1 Sek. Dauer in Frage: Es sind Verunreinigungen, Fasern und Wassertropfen, die allmählich das Öl zwischen den Elektroden verschlechtern. Der zweite Grund kommt vor bei Belastungen, deren Dauer kleiner als etwa 1 Sek. ist: Es ist die Trägheit des zum Durchschlag führenden Vorganges. Der dritte Grund spielt bei Stoßspannungen von der Größenordnung 1 Millionstel Sek. eine Rolle: Es ist die Bedingung einer Mindestenergie.

Das ganze Gebiet hat neuerdings R. Naeher (46) untersucht, und zwar bei Transformatorenöl, Petroleum, Rizinusöl und Xylol. Die Dauer der Beanspruchung belief sich von 100 bis $3 \cdot 10^{-9}$ Sek. Er erhielt eine etwa zehnfache Erhöhung der Festigkeit mit abnehmender Dauer. Seiner Ansicht, daß die Verschlechterung ausschließlich auf Brückenbildung durch Faserteilchen beruhen würde, können wir uns auf Grund des oben Gesagten nicht anschließen.

III. Einfluß physikalischer Zustandsgrößen.

9. Temperatur.

Die Temperatur beeinflußt nicht unwesentlich die Festigkeit von Flüssigkeiten. Im allgemeinen nimmt letztere mit steigender Temperatur ab. Ganz bedeutend wird diese Abnahme in der Nähe des Siedepunktes.

In einzelnen Fällen hat man auch ein Ansteigen der Festigkeit mit der Temperatur, so insbesondere bei Ölen, zwischen 0 und 70° C. Leider läßt sich die Temperaturabhängigkeit nicht leicht dazu verwerten, unter den vorhandenen Theorien zu entscheiden, da sie qualitativ durch jede erklärt werden kann. Man wird jedenfalls quantitative Über-

einstimmung verlangen müssen, soll man zu einer der Theorien mehr Vertrauen haben als zur anderen.

Für nichtviskose organische Flüssigkeiten erwähnen wir die Arbeit von Sorge (6). Bei Hexan sieht man deutlich, wie die Festigkeit beim Siedepunkt rasch abfällt. Die Plattenelektroden hatten einen Abstand von 0,5 mm.

Temperatur in °C	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm Xylol	Hexan
20	455	365
30	—	360
40	465	355
50	—	350
60	460	325
65	—	300
68,5	—	280
69	—	230
80	460	—
100	405	—

Es ist bedauerlich, daß für diese Gruppe von Stoffen die von Sorge beinahe die einzige Arbeit ist. Sie haben in der praktischen Elektrotechnik wenig Bedeutung, dies ist der Grund, warum sie so wenig untersucht werden.

Um so öfter ist Transformatorenöl untersucht worden. Hier findet man das schon erwähnte Steigen der Durchschlagsfestigkeit zwischen 0 und etwa 60°. Folgende Tabelle enthält die Ergebnisse von Friese (13).

Temperatur in °C	Durchschlags-festigkeit in kV/cm
0	80
20	130
40	165
60	175
80	170
100	165
120	150

Ähnliche Kurve findet Spath (9):

Temperatur in °C	Durchschlags-festigkeit in kV/cm
10	290
30	340
50	360
70	380
90	360

Auch die Kurve von Dräger (11) sei mitgeteilt, und zwar der aufsteigende Ast. Neben der Temperatur steht auch gleich die Viskosität in absoluten Einheiten, ferner in der vierten Spalte die nach der Theorie des Verf. berechneten Werte, worauf wir weiter unten noch zurückkommen.

Temperatur in °C	Viskosität in abs.	Durchschlagsfestigkeit gefunden	berechnet
20	0,59	294	295
40	0,18	322	319
60	0,098	354	345
80	0,054	382	388

Unterhalb von 0° hat man ebenfalls negativen Temperaturkoeffizienten, wie über 70°. Sehr deutlich geht das z. B. aus einer Kurve von H. Tobey (47) hervor, der die Durchschlagsfestigkeit bis unter — 10° verfolgte. Hier befindet sich der sogenannte Stockungspunkt des Öles, welches von da ab immer mehr die Eigenschaften eines festen Körpers annimmt, dessen elektrische Festigkeit (entsprechend der mechanischen) höher liegt als für Flüssigkeiten. Daher ist es verständlich, daß hier die Durchschlagsfestigkeit wieder ansteigt.

Temperatur	Durchschlagsspannung Maximalwert
— 10	105
0	65
+ 10	65
20	67
30	68

Die Gesamtkurve muß daher *S*-förmigen Verlauf haben. Das ganze Gebiet hat Toriyama aufgenommen.

Temperatur	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm
— 60	700
— 10	470
+ 20	490
40	520
60	550
80	570
105	510

Wenig erklärlich ist ein Befund von Flight (7), wonach der positive Temperaturkoeffizient bei wagerechter Funkenstrecke größer ist als bei lotrechter und nicht einmal bei 100° C ins negative umschlägt. Er versucht, den Sachverhalt durch die mechanischen Strömungen im Öl zu deuten.

Temperatur	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm wagerecht	lotrecht
20	110	170
40	145	215
60	180	260
80	250	275
100	335	240

Nun zur Erklärung der vorhandenen zwei Effekte. Der erste scheint die allgemeine Tendenz auszudrücken, daß bei Abwesenheit von störenden Einflüssen die Festigkeit stets mit steigender Temperatur abnimmt. Die Peeksche Ionisationstheorie erklärt das damit, daß infolge der höheren Ionenbeweglichkeit der Durchschlagsstrom leichter zustande kommen kann. Güntherschulze (43) erklärt sie auf Grund seiner Verdampfungstheorie folgendermaßen: Die Arbeit der Ionen wird zur Verdampfung der Flüssigkeit verwendet. Mit steigender Temperatur nimmt die Verdampfungswärme ab, folglich genügt eine geringere Arbeit, also eine kleinere Feldstärke, um den Durchschlag einzuleiten. Diese Erklärungen sind zunächst rein qualitativ.

Die Theorie des Verf. (36) erklärt diesen Zusammenhang wie folgt: Da die elektrischen Kräfte die kapillaren Kräfte zu überwinden haben, diese aber mit steigender Temperatur abnehmen, so nimmt die Durchschlagsfeldstärke auch ab. Dazu kommt noch, daß das Volum der vorhandenen Gasblasen bei steigender Temperatur zunimmt, der Durchschlag also leichter erfolgt.

Nach der im 6. Abschnitt gegebenen Gleichung läßt sich wenigstens die Größenordnung des Effektes berechnen. Geht man von der vereinfachten Gleichung

$$\mathfrak{E}_D = \sqrt{\frac{\gamma}{a}}$$

aus und schreibt für γ

$$\gamma = \gamma_0 (1 - \nu t)$$

und für a

$$a^3 = a_0^3 (1 + \alpha t),$$

so hat man näherungsweise

$$\mathfrak{E}_D = \sqrt{\frac{\gamma_0}{a_0}\left|1 - \left(\nu + \frac{\alpha}{3}\right)t\right|}.$$

Nun ist $\nu \sim 0{,}004$ und $\alpha = 0{,}0036$, also

$$\mathfrak{E}_D = \sqrt{\frac{\gamma_0}{a_0}(1 - 0{,}005\, t)}.$$

Daraus hat man

$$\frac{1}{\mathfrak{E}_D}\frac{d\mathfrak{E}_D}{dt} = \frac{0{,}0025}{1 - 0{,}005\, t}.$$

Die Gleichung zeigt, daß die prozentuale Änderung mit steigender Temperatur zunimmt. Dies entspricht den experimentellen Befunden. Die Gleichung gilt weder für zu tiefe Temperaturen, wo die Viskosität und auch andere Momente in den Vordergrund treten, noch für zu hohe Temperaturen, schon weil da die Oberflächenspannung weniger als linear mit der Temperatur abnimmt.

Für 100° C ergibt die Formel 0,005, also für 10° Temperaturänderung 5 Proz. Aus der Kurve von Sorge für Xylol hat man für 100° 415 kV/cm, für 90° 440: Das gibt 6 Proz. für 10°. Die Kurve von Toriyama gibt für 100° 540 kV/cm, für 90° 570. Das gibt 5 Proz. für 10°. Für 50° C ergibt die Formel 3,3 Proz. für 10°. Aus der Kurve von Sorge für Hexan hat man für 55° 340 kV/cm, für 45° 353, das gibt 3,7 Proz. für 10°. Wie ersichtlich, stimmt die Gleichung in diesem Gebiet recht gut mit der Erfahrung.

Was nun den zweiten Effekt betrifft, nämlich die Erhöhung der Festigkeit im Gebiet von 0 bis 70° bei Ölen, so hängt das offenkundig mit der Viskosität zusammen. Güntherschulze sagt, daß die Reibung der Ionen in flüssigeren Lösungsmitteln geringer wird, dementsprechend sinkt die Arbeit und die erzeugte Wärme, folglich ist die Verdampfung erschwert. Der Gedanke ist ebenfalls nur qualitativ ausgeführt worden.

Manche Autoren stehen auf dem Standpunkt, daß dieser Effekt auf Verunreinigungen, insbesondere auf steigender Entfeuchtung mit zunehmender Temperatur beruht. So hat z. B. T. Hirobe (48) bei ganz reinen Ölen nur sehr geringe Änderungen in der Festigkeit zwischen 15 und 160° gefunden. In ähnlichem Sinne spricht der Befund von Peek, wonach durch Auskochen des Öles der Effekt verschwinden würde. Wird das Öl erwärmt, so nimmt seine Festigkeit zu, wird es daraufhin abgekühlt, so bleibt die Festigkeit auf derselben Stufe stehen. Er erhielt folgende Zahlen:

Temperatur in °C	Durchschlagsspannung in kV
28	45
40	48
55	51
70	52
87	52
28	52

Dieser Befund ist aber nicht ganz eindeutig, denn da die Feuchtigkeit für sich einen starken Einfluß auf die Festigkeit hat, ist es besser, mit Ölen zu arbeiten, die im Laufe des Versuches ihre Feuchtigkeit nicht ändern.

Die Theorie des Verf. erklärt ebenfalls den Einfluß der Viskosität, wie an der in Abschnitt 6 mitgeteilten Gleichung ersichtlich, wobei allerdings nicht zu vergessen ist, daß der Ansatz $\frac{k}{\eta}$ für den Viskositätseinfluß nicht theoretisch begründet ist. Vergleicht man sie aber mit der Erfahrung, so ist beste Übereinstimmung vorhanden, wie die Tabelle des Drägerschen Versuches zeigt. Aber es wäre sehr erwünscht, den hydrodynamischen Vorgang, der dem angenommenen Mechanismus zugrunde liegt, mathematisch

zu verfolgen, um wenigstens die Größenordnung der Konstante k theoretisch begründet zu sehen.

Zum Schluß sei auch noch die von Schumann gefundene Temperaturabhängigkeit der Polarität des Durchschlages erwähnt. Wie in Abschnitt 6 erwähnt, ist die Festigkeit für negative Spitzen größer als für positive. Die Verhältniszahl der beiden Spannungen nimmt nun mit steigender Temperatur etwas zu, wie folgende Tabelle zeigt:

Temperatur in °C	Polaritätsverhältnis
20	1,17
40	1,22
60	1,27
80	1,30

10. Druck.

Als letzter der zu betrachtenden Einflüsse auf die Durchschlagsfestigkeit bleibt der atmosphärische Druck. Die Festigkeit nimmt mit steigendem Druck in sehr starkem Maße zu. Für Gase liegen erste Anfänge vor, diese Erscheinung technisch z. B. für statische Voltmeter sowie verlustlose Kondensatoren auszunützen, bei Flüssigkeiten ist bis jetzt kein Gebrauch davon gemacht worden[1]).

Einige Autoren untersuchten den Einfluß des Druckes unterhalb von einer Atmosphäre. So z. B. Friese (13), dessen Befunde bei Wechselspannung durch folgende Zahlen wiedergegeben werden:

Druck in mm Hg	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm
400	170
500	180
600	190
700	200

oder in Gleichungsform:

$$\mathfrak{E}_D = 122 + 86\,p,$$

falls p in Atmosphären gemessen wird.

Weiter untersuchte Sorge (6) dieses Druckgebiet mit Kupferplatten in einem Abstand von 0,5 mm. Aus technischen Gründen konnte er nicht unter 350 mm kommen, obwohl gerade dieses tiefe Druckgebiet von besonderem Interesse wäre.

Druck in mm Hg	Durchschlagsfestigkeit in kV/cm	
	Xylol	Hexan
750	475	375
650	430	350
550	395	315
450	340	280
350	305	255

1) Einen Vorschlag für ein Hochspannungskabel unter Druck enthält das amerikanische Patent Nr. 1524124 von Fisher und Atkinson.

Drückt man diese Werte ebenfalls in Gleichungen aus, so erhält man für Xylol

$$\mathfrak{E}_D = 159 + 320\,p$$

und für Hexan

$$\mathfrak{E}_D = 144 + 235\,p.$$

Sorge hat seine Kurven mit der Frieseschen Kurve verglichen und gefunden, daß sich alle drei im Punkte: 125 mm Druck und 106 kV/cm schneiden. Ob diesem Punkte eine reelle Bedeutung zukommt, ist noch fraglich.

In tiefem Druckgebiet arbeitet auch W. Kieser (49). Seine Messungen erstrecken sich auf drei Ölsorten, Hexan und Xylol. Die Festigkeit nimmt linear bis zu einem bestimmten Druck ab, von welchem abwärts bis zum Dampfdruck die Festigkeit konstant bleibt. Bei Ölen ist in diesem letzten Gebiet die Streuung nur 1 Proz., bei Hexan und Xylol fehlt diese Abnahme der Streuung. Der Einfluß des Elektrodenmaterials auf die Festigkeit verschwindet bei tiefsten Drucken.

Drucke über einer Atmosphäre hat F. Kock (39) untersucht. Er verwendete stählerne Gefäße, in welche eine Zylinderfunkenstrecke eingebaut war. Die Drucke erzeugte er teils mit einer hydraulischen Pumpe, teils mit komprimierter Luft. Er untersuchte Petroleum, Rizinusöl und Gargoyle-Transformatorenöl, letzteres bei 60 und 20periodiger Wechselspannung sowie Gleichspannung. Man sieht hier wieder, entsprechend dem im Abschnitt 8 Gesagten, die Zunahme der Festigkeit mit der Frequenz.

Druck in Atm.	Petroleum	Rizinusöl	Transformatorenöl		
			60 Hz	20 Hz	Gl.-Sp.
0	155	140	105	100	100
10	330	310	210	200	170
20	420	410	320	280	220
30	480	480	390	340	250
40	510	510	440	390	255
50	530	530	—	—	—
60	—	540	—	—	—
70	—	540	—	—	—

Die Kurven verlaufen anfangs geradlinig, biegen dann aber nach der Abszissenachse ab und manche streben sogar einem Grenzwert zu. Kock hat für das lineare Gebiet den vorigen analoge Gleichungen aufgestellt, jedoch sieht man hier, daß für diesen größeren Druckbereich diese Gleichungen ungenügend werden.

Da die Öle in diesen Versuchen nicht genügend gereinigt waren, enthielten sie viel Staub- und Faserteilchen, so daß sie dadurch an Bedeutung etwas verlieren. Da jedoch ähnliche Versuche bis jetzt noch nicht wiederholt wurden, so müssen

wir sie einstweilen für die theoretischen Überlegungen verwerten.

Eine Erklärung für diese starke Druckabhängigkeit gibt ungezwungenerweise die Theorie von Güntherschulze. Erstens nimmt nämlich die gesamte Verdampfungswärme mit dem Druck zu: die latente Wärme ist zwar druckunabhängig, die maximale Arbeit dagegen nimmt zu. Deshalb wird die zur Verdampfung erforderliche elektrische Arbeit und die Durchschlagsfeldstärke größer.

Zweitens findet in der gebildeten Dampfblase der Durchschlag mit steigendem Druck erst bei höherer Feldstärke statt, genau so wie bei Gasen die Spannung mit dem Druck steigt. Dies hat bekanntlich in der Abnahme der mittleren freien Weglänge seinen Grund.

Eine wesentliche Stütze der Theorie liegt in dem Befund von F. Hayashi (50), wonach die Spannungsdruckkurve für Kohlendioxyd bei Zimmertemperatur in der Nähe des Verflüssigungspunktes (59 Atm.) keinerlei Unstetigkeit aufweist. Da die Verdampfungswärme in diesem Gebiet (nicht weit vom kritischen Punkt) relativ klein ist, so tritt dieser Term in der Durchschlagsfeldstärke hier zurück, es bleibt nur der Term des Gasdurchschlages übrig, und die Theorie erklärt demnach ohne weiteres die Stetigkeit der Kurve.

Die soeben zitierten Befunde von Kieser sprechen für die Edlersche Erweiterung der Theorie von Güntherschulze (s. Abschn. 7). Da nämlich in der Nähe des Dampfdruckes der Siedeverzug geringer wird, so wäre es verständlich, daß die Streuung und der Einfluß des Elektrodenmaterials hier verschwinden.

Die von Kock gefundene Druckabhängigkeit wird auch durch die vom Verf. herrührende Theorie erklärt. Wir hatten die Gleichung

$$\mathfrak{E}_D^2 = \frac{\gamma}{a} + \frac{k}{\eta} p .$$

Wir geben im folgenden tabellarisch einen Vergleich der beobachteten und berechneten Werte für Petroleum und Transformatorenöl.

Druck in Atm.	Durchschlagsfeldstärke in kV/cm			
	Petroleum		Transformatorenöl	
	beobachtet	berechnet	beobachtet	berechnet
0	155	153	105	108
10	330	306	210	238
20	420	405	320	319
30	480	484	390	383
40	510	550	440	438

In Gleichungsform geschrieben, hat man für Petroleum

$$\mathfrak{E}_D^2 = 2{,}35 \cdot 10^4 + 0{,}70 \cdot 10^4 p$$

und für Transformatorenöl

$$\mathfrak{E}_D^2 = 1{,}15 \cdot 10^4 + 0{,}45 \cdot 10^4 p .$$

($\mathfrak{E}_D$ in kV/cm und p in Atmosphären gemessen.) Der gekrümmte Kurvenverlauf wird durch die Gleichungen richtig wiedergegeben.

Wie erinnerlich, konnte im vorigen Abschnitt die Temperaturabhängigkeit der Durchschlagsfeldstärke für Transformatorenöl auch richtig berechnet werden. Die für die Drägersche Versuchsreihe verwandte Gleichung lautet

$$\mathfrak{E}_D^2 = 8{,}1 \cdot 10^4 + \frac{0{,}38}{\eta} 10^4 p .$$

Für Zimmertemperatur ($\eta = 0{,}59$) wird der Faktor von p: $0{,}64 \cdot 10^4$, was der Größenordnung nach gut mit dem aus den Kockschen Versuchen folgenden Wert $0{,}45 \cdot 10^4$ übereinstimmt.

Mit dem Frieseschen Versuch läßt sich die Formel nicht gut in Einklang bringen. Die Änderungen unter einer Atmosphäre scheinen jedenfalls nach dem Experiment wesentlich größer zu sein als über einer Atmosphäre. Die Kurve scheint hier eine Unstetigkeit zu haben. Vielleicht wird aber diese Unstimmigkeit bei einer neuen Versuchsreihe, welche mit demselben Material und derselben Apparatur das ganze Gebiet durchnimmt, verschwinden.

Was den Befund von Hayashi betrifft, so steht er keineswegs mit unserer Gleichung in Widerspruch. Es ist nämlich zu bedenken, daß wir stillschweigend die Annahme machten, die Luftschicht sei ionisiert und der Durchschlag erfolge erst dann, wenn das mechanische Hindernis überwunden werden kann. Für zu hohe Drucke muß sich aber die Sachlage ändern. Die zweite Bedingung wird hier erfüllt sein, und zwar bei einer Feldstärke, bei der die erste Bedingung noch nicht erfüllt ist. Bei hohen Drucken wird also die Durchschlagsbedingung mit der des Durchschlages der Luftschicht zusammenfallen, so daß beim Verdampfungspunkt keine Unstetigkeit zu erwarten ist.

Übrigens fällt es hier wieder auf, daß zwischen der Theorie von Güntherschulze und der des Verf. auch betreffs der Druckabhängigkeit ein Berührungspunkt vorhanden ist. In beiden wird sie durch die Arbeit in der Gasphase gegen den äußeren Druck erklärt. Während diese bei uns in der Ausdehnung der Gasblase zum Ausdruck kommt, ist sie bei Güntherschulze in der gesamten Verdampfungswärme enthalten.

In diesem Sinne könnte man also den Mechanismus nach Güntherschulze als einen Grenzfall unseres Ansatzes, nämlich jenen für hohe Drucke, auffassen.

Literatur.

1) K. Przibram, Physik. Zeitschr. **5**, 574, 1904.
2) A. Heydweiller, Ann. d. Phys. **17**, 346, 1905.
3) M. Wien, Ann. d. Phys. **83**, 327, 1927.
4) E. Arnold, Die Wechselstromtechnik. Springer, Berlin 1922.
5) I. Almy, Ann. d. Phys. **1**, 508, 1900.
6) J. Sorge, Arch. El. **13**, 189, 1924.
7) I. Flight, B.E.A.M.A. **9**, Februar 1921.
8) H. Zipp, Mitt. Ver. Elektr. Werke, S. 430, 1922.
9) W. Spath, Arch. El. **12**, 331, 1923.
10) F. Schröter, Arch. El. **13**, 67, 1923.
11) K. Dräger, Arch. El. **13**, 366, 1924.
12) F. Peek, Gen. Electr. Rev. **18**, 821, 1915.
13) R. Friese, Wiss. Veröff. Siem.-Konz. **1**, 41, 1921.
14) A. Gyemant, Zeitschr. f. Phys. **33**, 780, 1925.
15) I. Hayden u. W. Eddy, Journ. A.I.E.E. **41**, 138, 1922.
16) W. Zimmermann, Electr. Journ. **7**, 231, 1928.
17) A. Schwaiger, Elektr. Festigkeitslehre. Springer, Berlin 1925.
18) S. Whitehead, Dielectric phenomena II. Benn, London 1928.
19) F. Peek, Dielectric phenomena in High Voltage Engineering. New York.
20) A. Heydweiller, Wied. Ann. **48**, 213, 1893.
21) M. Töpler, ETZ **28**, 998, 1907.
22) F. Farmer, Proc. A.I.E.E., S. 2193, 1913.
23) A. Schwaiger, ETZ **48**, 1657, 1927.
24) F. Wöhr, Arch. El. **20**, 444, 1928.
25) L. Dreyfuss, Arch. El. **13**, 121, 1924.
26) A. Roth, Hochspannungstechnik. Springer, Berlin 1927.
27) W. O. Schumann, Elektrische Durchbruchsfeldstärke. Springer, Berlin 1923.
28) Y. Toriyama, Arch. El. **19**, 31 (1927).
29) P. Shaw, Proc. Phys. Soc. London **20**, 289, 1906.
30) I. Hayden u. C. P. Steinmetz, Proc. A.I.E.E., S. 747, 1910.
31) E. Wedmore, Electrician **87**, 702, 1921.
32) E. Jona, Atti Assoc. Elettrot. Ital. H. 1, 1907.
33) M. Vogelsang, ETZ, **37**, 153, 1916.
34) A. Nikuradse, Arch. El. **20**, 403, 1928.
35) V. Engelhardt, Arch. El. **13**, 181, 1924.
36) A. Gyemant, Zeitschr. f. techn. Phys. **9**, 398, 1928.
37) E. Marx, Arch. El. **20**, 579, 1928.
38) I. Almy, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. **1**, 95, 1899.
39) F. Kock, ETZ **36**, 85, 1915.
40) A. Gyemant, Wiss. Veröff. Siem.-Konz. **5**, H. 3, 87, 1927.
41) A. Gyemant, Wiss. Veröff. Siem.-Konz. **7**, H. 1, 134, 1928.
42) L. S. Ornstein, G. I. D. J. Willemse u. I. H. G. Mulders, Zeitschr. f. techn. Phys. **9**, 241, 1928.
43) A. Güntherschulze, Jahrbuch d. Radioakt. u. Elektr. **19**, 92, 1922.
44) P. Böning, Zeitschr. f. Fernm. **9**, 161, 1928.
45) E. Marx, ETZ **49**, 50, 1928.
46) R. Naeher, Arch. El. **21**, 169, 1928.
47) H. Tobey, Trans. A.I.E.E., S. 1189, 1910.
48) T. Hirobe, Electrician **86**, Nr. 2235, 1921.
49) W. Kieser, Arch. El. **20**, 374, 1928.
50) F. Hayashi, Ann. d. Phys. **45**, 431, 1914.

(Eingegangen 25. November 1928.)

ORIGINALMITTEILUNGEN.

Eine einfache Methode zur Bestimmung von $\frac{C_p}{C_v}$.

Von E. Rüchardt.

Seit einiger Zeit sind Glasröhren im Handel, die einen so genau vorgeschriebenen und so exakt kreisrunden Querschnitt haben, daß eine käufliche Präzisionsstahlkugel von gleichem Durchmesser fast luftdicht in dem Rohr gleitet. Läßt man die Kugeln in die vertikal gehaltene Röhre hineinfallen und verschließt schnell das untere Röhrenende mit der Hand, so bleibt die Kugel unter raschen Pendelbewegungen stecken und sinkt dann nur ganz allmählich tiefer. Ich habe ein derartiges Rohr zuerst bei Herrn Gudden in Erlangen vor etwa $1^1/_2$ Jahren gesehen. Jetzt liefert die Firma Leybold solche Röhren von 55 cm Länge u. 1,6 cm lichter Weite mit einer passenden Stahlkugel. Im folgenden soll kurz ein instruktiver Vorlesungsversuch beschrieben werden, der sich mit Hilfe dieser Röhre ausführen läßt.

Steckt man die Röhre senkrecht in einen durchbohrten Gummistopfen, der eine 5 bis 6 Liter fassende Glasflasche luftdicht verschließt und läßt die Kugel in die Röhre fallen, so führt die Kugel wenig gedämpfte Schwingungen mit einer Periode von fast 1 sec aus. Die Bestimmung der Schwingungsdauer liefert das Verhältnis der spezifischen Wärmen $\frac{C_p}{C_v}$ für das in der Flasche eingeschlossene Gas. Dieses kann leicht variiert werden wenn die Flasche unten seitlich noch mit einem Glashahn versehen ist.

Es sei: m Masse der Kugel, q Rohrquerschnitt, V Volumen der Flasche und des unteren Rohrteiles, b Barometerdruck, p Druck in der Flasche.

Die Kugel befindet sich im Gleichgewicht wenn

$$p = b + \frac{mg}{q}$$

ist. Schwingt die Kugel um die Strecke x über die Gleichgewichtslage hinaus, wobei der Druck p sich um dp ändert, so gilt

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = q\,dp.$$

Da der Vorgang adiabatisch erfolgt, hat man $pV^K = \text{const}$ und durch Differentiation nach V:

$$dp = -kp\frac{dV}{V} = -\frac{kpqx}{V},$$

also:

$$\frac{m\,d^2x}{dt^2} = -\frac{kpq^2x}{V}.$$

Die Periode dieser Schwingung ist

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{mV}{kpq^2}},$$

und es folgt

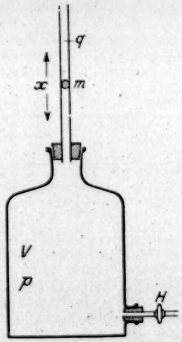
$$k = \frac{4\pi^2 m V}{q^2 p T^2}.$$

Bei meinen Versuchen betrug:

$V = 5270$ ccm
$q = 2{,}01$ cm²
$m = 16{,}65$ g
$b = 72{,}3$ cm $Hg = 9{,}6 \cdot 10^5 \frac{\text{Dyn}}{\text{cm}^2}$.

Woraus sich berechnet $p = 9{,}69 \cdot 10^5 \frac{\text{Dyn}}{\text{cm}^2}$.

Die Versuche wurden mit Luft und Kohlensäure ausgeführt. Beide Gase waren weder gereinigt noch getrocknet. CO_2 wurde einem Kippschen Apparat entnommen.



Da T quadratisch in die Formel für k eingeht, muß die Schwingungsdauer ziemlich genau bestimmt werden. Für Vorführungszwecke genügt immerhin eine Stoppuhr, die $^1/_{10}$ sec genau gibt, da man 10 ganze Schwingungen bequem beobachten kann. Ich habe bei den Messungen einen Chronographen benutzt und 10 mal die Zeit für je 10 ganze Schwingungen bestimmt. Es ergab sich:

$T = 0{,}797 \pm 0{,}005$ für Luft
$T = 0{,}834 \pm 0{,}004$ für CO_2

Die Ausrechnung ergibt:

$k = 1{,}39$ statt $1{,}40$ für Luft
$k = 1{,}27$ statt $1{,}30$ für CO_2

Die Genauigkeit entspricht der Genauigkeit der Zeitbestimmung, so daß andere größere Fehlerquellen nicht vorhanden zu sein scheinen. Die Methode hat für Zwecke der Vorlesung nicht nur den Vorteil, das Verhältnis $\frac{C_p}{C_v}$ rasch und ziemlich genau zu liefern, sondern demonstriert auch sehr anschaulich die adiabatische Elastizität der Gase. Zu Präzisionsmessungen ist eine ähnliche Methode mit schwingendem Quecksilber in einem U-Rohr bereits von Assmann[1]) und P. A. Müller[2]) vor langer Zeit benutzt worden; doch ist die hier beschriebene wegen ihrer Einfachheit und Übersichtlichkeit für Demonstrationszwecke geeigneter.

1) Assmann, Pogg. Ann. **85**, 1. 1852.
2) P. A. Müller, W. Ann. **18**. 94. 1883.

München, Physik. Inst. der Universität, den 28. Dezember 1928.

(Eingegangen 29. Dezember 1928.)

Über einen Fall von direktem Übergang der unselbständigen zur selbständigen Elektrizitätsleitung in stark ionisierten Gasen von hohem Druck.

Von Rudolf Thaller.

Die normale Strom-Spannungscharakteristik eines etwa durch Röntgenstrahlen, β- und γ-Strahlen oder durch ultraviolette Lichtstrahlen ionisierten Gases ist bekanntlich durch eine Kurve von der Form wie sie Fig. 1 zeigt darzustellen.

Zu Beginn steigt die Stromstärke proportional der angelegten Spannung. Bei weiterer Spannungssteigerung nimmt die Stromstärke weniger als proportional zu, bis schließlich als praktisch konstanter Höchstwert der Sättigungsstrom erreicht wird. Ist die Sättigungsstromstärke erreicht, so kann die Feldspannung im

allgemeinen bei Gasen von hohem Druck (Atm. Druck) um mehrere 100 Proz. erhöht werden, ohne daß eine merkliche Zunahme der Stromstärke festgestellt werden könnte. Während also bei konstanter Ionisierungsquelle, Röntgenstrahlen

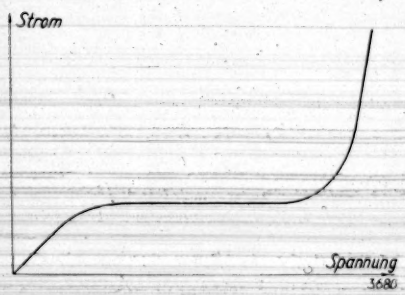


Fig. 1.

usw. bei geringer Spannungszunahme der dauernd erzeugte und vorhandene Trägerbestand im Vergleich zur Trägerabwanderung unerschöpflich ist (Ohmsches Gesetz) wird bei vorhandener Sättigungsspannung der Trägerbestand völlig erschöpft. Steigt die Spannung um ein Vielfaches der Sättigungsspannung, so tritt schließlich ein verhältnismäßig rasches, lawinenartiges

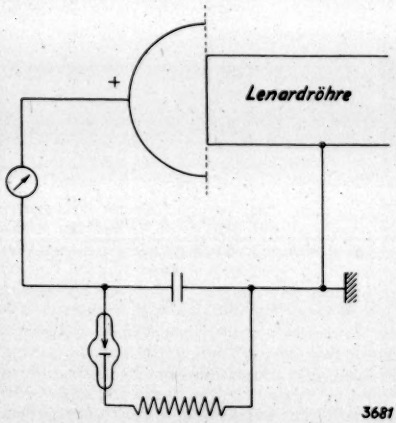


Fig. 2.

Ansteigen der Stromstärke ein, also der Übergang von der unselbständigen zur selbständigen Elektrizitätsleitung in Gasen.

Es soll nun im folgenden ein Fall beschrieben werden, wo die Stromspannungskurve nicht den gewohnten Verlauf zeigt, sondern einen direkten Übergang vom Ohmschen Strom zum Lawinenstrom ohne jedwede Andeutung einer Verflachung der Kurve. Die Versuchsanordnung (Fig. 2) war folgende: Das Ionisierungsgefäß war halbkugelförmig ausgebildet, das Füllgas war gewöhnliche Zimmerluft. Die positive Elektrode bestand aus einer Messinghalbkugel, deren Radius 12,5 cm betrug, die negative Elektrode war das geerdete Fenster der Lenardhochleistungsröhre, welches zugleich die Ausgangsstelle des Ionisators, im gegebenen Fall der rasch bewegten Elektronen, deren praktische Reichweite gleich dem Radius der Hohlkugel war. Die Röhrenstromstärke betrug 1 mA, die Röhrenscheitelspannung 120 kV. Die Fensterdicke des Lenardfensters war etwa 0,013 mm, das Fenstermaterial war reines Nickel. Die Versuchsanordnung, Lenardröhre, Pumpaggregat und Hochspannungsapparatur war dieselbe, wie vor kurzem beschrieben in Physik. Zeitschr. **29**, 841—846. 1928.

Daß wir es im gegebenen Fall mit Kolonnenionisation zu tun haben, braucht nicht erst hervorgehoben zu werden. Die Stromquelle für die Ionisationskammer war entsprechend dimensioniert, sie bestand aus einem einseitig geerdeten Hochspannungstransformator, welcher über ein Glühkathodenventil parallel geschaltete Kondensatoren auflud. Die angelegte Spannung konnte bis zum Überschlagen zwischen den Elektroden der Ionisationskammer, welches bei etwa 50000 Volt eintrat, gesteigert werden. Aus der Kurve der Fig. 3 ersieht man, daß selbst bei Steigerungen relativ schon sehr hoher Potentialdifferenzen zwischen den beiden Elektroden eine stets gleichmäßige Zunahme des Ionisationsstromes stattfindet. Beim Anwachsen der Span-

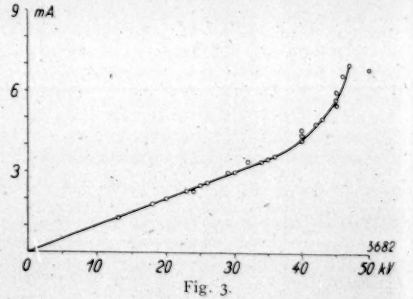


Fig. 3.

nung über 35000 Volt zeigt sich nunmehr ein schnelles Anwachsen der Ionisationsstromstärke, bis bei 50000 Volt laut knallende Funkenentladung die Kurve meßtechnisch unterbricht. Die Kondensatorspannung wurde mit der Kugel-

funkenstrecke unter Vorschaltung von hochohmigen Wasserwiderständen gemessen.

Die Luftleitungsströme in gewöhnlichen Ionisationskammern, bei welchen Röntgenstrahlen, β- und γ-Strahlen und ultraviolettes Licht als Ionisatoren zur Anwendung kommen, sind von einer Größenordnung von rund 10^{-9} Amp. In dem beschriebenen Fall übersteigen die gemessenen Stromstärken mehrere Millionen Mal den gewohnten Wert.

In dem vorletzten Absatz: „Über das Dosieren von Kathodenstrahlen an Lenard-Hochleistungsröhren" (Physik. Zeitschr. **29**, 846, 1928) heißt es u. a.: „Würde man für die Intensitäts- und Energiemessungen beispielsweise die Luftleitung verwenden, wie es bei Röntgenstrahlen allgemein üblich ist, so bekommt man allerdings ganz unvergleichlich höhere Sättigungsströme als bei der durch Röntgenstrahlen ionisierten Luft. Bringt man zwei parallel übereinander oder nebeneinander gestellte *Cu*-Platten von der Größe etwa 5×10 cm im Abstand von 4—5 cm in die Nähe des Fensters, so kann man bei einer Sättigungsspannung von etwa 8000 Volt Sättigungsstromstärken bis zu mehreren Milliampere erhalten."

Diese Angabe entspricht nicht den Tatsachen, wie aus dem obigen hervorgeht und die Ursache, eine Sättigungsstromstärke bei etwa 8000 Volt gefunden zu haben, lag darin, daß der damals verwendete Transformator viel zu schwach dimensioniert war, so daß die damals aus dem Übersetzungsverhältnis errechnete Zahl nicht der wahren sekundären Spannung des Transformators entsprach. Die sekundäre Spannung des kleinen Transformators erlitt bei der entsprechenden Stromentnahme einen Zusammenbruch und täuschte so eine Sättigungsspannung bei der beschriebenen Versuchsanordnung vor. Die wirkliche sekundäre Spannung des Aufladetransformators wurde damals keiner Messung mit der Kugelfunkenstrecke unterzogen.

(Eingegangen 15. Dezember 1928.)

BESPRECHUNGEN.

C. W. Oseen, Neuere Methoden und Ergebnisse der Hydrodynamik. (Mathematik und ihre Anwendungen in Monographien und Lehrbüchern, herausgegeben von E. Hilb, Bd. 1.) Gr. 8°. XXIV u. 337 S. Mit 7 Fig. Leipzig, Akad. Verlagsges. m. b. H. 1927. Geh. RM. 22.—, geb. RM. 24.—.

Das Buch Oseens bildet einen sehr wichtigen Beitrag zur theoretischen Hydrodynamik. Es ist entstanden aus einer großen Reihe mathematischer Untersuchungen, welche seit etwa 1907 vom Verfasser selbst sowie von einigen seiner Mitarbeiter (Faxén, Zeilon) an verschiedenen Stellen publiziert worden sind. Das Buch beschränkt sich aber nicht darauf, eine Übersicht dieser Untersuchungen zu geben; es faßt sie nach bestimmten Gesichtspunkten geordnet zu einem einheitlichen Ganzen zusammen, wobei auch ältere und neuere Forschungen anderer Autoren (wie z. B. H. A. Lorentz, v. Smoluchowski, Noether, Bairstow u. a.) mit in Betracht gezogen werden. Das ganze Werk unterscheidet sich durch das Bestreben nach großer mathematischer Strenge. Der behandelte Stoff ist dadurch sehr spröde, namentlich auch, weil öfters schwierige Abschätzungen bei der Ausführung von Grenzübergängen erforderlich sind. Sehr zu rühmen ist deshalb die überaus klare und immer geradeaus auf das Ziel anstrebende Weise, in der dieser Stoff dem Leser vorgeführt wird. Die Teile I und II, welche die Theorie der linearisierten hydrodynamischen Gleichungen behandeln, kann man geradezu als klassisch betrachten. — Eine in die Einleitung aufgenommene ausführliche Übersicht des Inhalts des Buches (S. V—XVII), sowie gelegentlich eingeschaltete Zusammenfassungen von gewonnenen Ergebnissen erleichtern das Studium des Werkes sehr; auch die übersichtliche Einteilung und Beschriftung der Paragraphen trägt dazu bei. Der Verlag hat das Buch in typographischer Hinsicht sehr gut versorgt, was vor allen Dingen für das Lesen der Formeln von großer Wichtigkeit ist.

Es ist wegen Raummangel nicht möglich, über alle behandelten Fragen zu berichten, und es mögen nur folgende Bemerkungen gemacht werden. Als Ausgangspunkt der Untersuchungen dienen die gewöhnlichen hydrodynamischen Gleichungen für inkompressible Flüssigkeiten, welche die Reibungsglieder in der bekannten, nach Navier und Stokes benannten Form enthalten. Bei der Anwendung auf langsame Bewegungen (d. h. bei Strömungen mit kleiner Reynoldsschen Kennzahl), pflegt man diese Gleichungen zu vereinfachen durch Fortlassung der in den Geschwindigkeiten quadratischen Glieder. Es ist bekannt, daß zuerst Oseen auf die Unzulänglichkeit des von Stokes für die stationäre Strömung gegebenen Systems:

$$\mu \Delta u_j - \frac{\partial p}{\partial x_j} = 0, \quad \Sigma \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \tag{a}$$

zur Beschreibung des Feldes in größerer Entfernung vom störenden Körper hingewiesen hat, und daß er dieses System ersetzt hat durch das „erweiterte System":

$$\mu \Delta u_j + \varrho U \frac{\partial u_j}{\partial x_1} - \frac{\partial p}{\partial x_j} = 0, \quad \Sigma \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0. \tag{b}$$

Die Theorie beider Systeme, sowie derer Verallgemeinerungen auf nichtstationäre Strömungen, wird in Teil I und Teil II behandelt, wobei die charakte-

ristischen Eigenschaften, welche aus der Anwendung des erweiterten Systems entspringen, klar beleuchtet werden. Das Hauptziel ist hier die Bestimmung des Strömungsfeldes, welches durch die Bewegung eines festen Körpers (Kugel, Ellipsoid) in einer im Unendlichen ruhenden Flüssigkeit erzeugt wird; die Flüssigkeit kann auch noch von sonstigen festen Wänden (einer oder zwei parallelen Ebenen, zylindrischem Rohr, einer zweiten Kugel) begrenzt sein. Es werden dabei nicht die Methoden der Reihenentwicklung nach gewissen Funktionssystemen zur Hilfe gezogen, sondern die direkteren Methoden, welche auf der Anwendung des Greenschen Satzes beruhen. Die dazu erforderlichen Greenschen Funktionen werden in Teil I für die verschiedenen Gleichungssysteme konstruiert. Nur bei dem in § 10. 3—5 gegebenen Beweis eines Hilfssatzes scheint eine Reihenentwicklung nach Kugelfunktionen noch unentbehrlich.

Die Benutzung des „erweiterten Systems" (b) ermöglicht es auch, die Annäherung einen Schritt weiter zu treiben, und eine Korrektur für den Einfluß der vernachlässigten quadratischen Glieder zu gewinnen.

Die in Teil II gewonnenen Resultate sind vom physikalischen Standpunkte sehr wichtig in Anbetracht der vielen Probleme, in welchen die Fallbewegung kleiner Körper eine Rolle spielt. Mit Rücksicht darauf sind für verschiedene verwickelte Formeln Tabellen der numerischen Werte mitgeteilt.

Als ein Beispiel für das mathematische Gepräge des Buches sei erwähnt, daß bei der Ableitung der Greenschen Formeln die hydrodynamischen Gleichungen, welche Ableitungen zweiter Ordnung enthalten, übergeführt werden in Integro-Differentialgleichungen, in welchen nur solche erster Ordnung auftreten, ebenso wie dies bei den Impulsgleichungen, aus welchen die Differentialgleichungen zweiter Ordnung entsprungen sind, der Fall ist. Es wird dann gezeigt, daß die Integro-Differentialgleichungen auch unmittelbar aus den Impulsgleichungen abgeleitet werden können, so daß man für die Gültigkeit der Integro-Differentialgleichungen — auf welchen ein großer Teil der weiteren Untersuchungen fußt — die Existenz zweiter Ableitungen von den Geschwindigkeitskomponenten nicht vorauszusetzen braucht. Auf diesen Punkt wird von Oseen besonderer Wert gelegt (man vgl. § 6. 8): einerseits, weil man, von molekularen Betrachtungen ausgehend, die Strömungsgeschwindigkeit nur als einen gewissen Mittelwert definieren kann, so daß bei der Definition von jeder höheren Ableitung neue Schwierigkeiten auftreten; andererseits, weil durch die Beschränkung auf Ableitungen erster Ordnung die Frage unter welchen Bedingungen die Gleichungen durch sukzessive Annäherungen gelöst werden können, wesentlich leichter zu beantworten ist. In Zusammenhang hiermit steht das in § 7 erörterte Problem ob eine anfänglich reguläre Bewegung immer regulär bleiben wird, und von welcher Art die im entgegengesetzten Falle auftretenden Singularitäten sind. — Als einfaches Beispiel von der Anwendung der Integralgleichungen sind in § 8 zwei Fragen bezüglich der Ausbreitung von Wirbelbewegungen in zähen Flüssigkeiten behandelt.

Der III. Teil des Buches befaßt sich mit einem ganz anderen Gebiet: in diesem Teil wird untersucht, welche Form die Lösung der „erweiterten Gleichungen" (b) für den Fall der Strömung um einen Körper annimmt, wenn man in ihr die Zähigkeit gegen Null konvergieren läßt (m. a. W. wenn man zu unendlich großen Reynoldsschen Kennzahlen übergeht). Dieser Teil hat für den Verfasser die größte Bedeutung, weil er durch diese Untersuchungen auf das Paradoxon von Euler und d'Alembert Licht zu werfen hoffte. Eigentlich würde hier (nach Oseens eigenen Worten) die Aufgabe vorliegen, die vollständigen Differential- oder Integralgleichungen für die Bewegung einer zähen Flüssigkeit exakt zu lösen und dann den Grenzübergang $\mu \to 0$ in der erhaltenen Lösung auszuführen. Weil diese Aufgabe zur Zeit unlösbar erscheint, hat Oseen sich bei dem wichtigsten Teil seiner Untersuchungen, sowie in dem vorliegenden Buch, auf die oben erwähnte Fragestellung beschränkt.

Es wird gezeigt, daß man bei diesem Grenzübergang nicht die altbekannte, im ganzen Felde wirbelfreie, Bewegung idealer Flüssigkeiten erhält, sondern eine Strömung, die in dem vom Körper durchschrittenen Teile durch eine gewisse Wirbelbewegung gekennzeichnet ist. Außerhalb dieses Gebietes ist die Strömung durch ein Potential φ bestimmt, daß in den einfachsten Fällen (zweidimensionale und rotationssymmetrische dreidimensionale Felder) im ganzen Felde regulär ist und der Bedingung $\Delta\varphi = 0$ unterliegt, jedoch nur auf einem Teil der Körperoberfläche der Bedingung $\frac{c\varphi}{cn} = U_n$ zu gehorchen hat, während es auf dem übrigen Teil durch eine andere Randbedingung festgelegt ist. Es folgt hieraus, daß das Integral $\iint \frac{c\varphi}{cn} dS$ über eine geschlossene, den Körper umschließende Fläche S im allgemeinen nicht den Wert Null haben wird, so daß φ sich im Unendlichen wie $\frac{C}{R}$ (oder wie $C \lg R$ im zweidimensionalen Falle) verhalten wird.

Diese Theorie hat schon sehr große Aufmerksamkeit auf sich gezogen, und man hat sogar von einem gewissen Gegensatz zu den Betrachtungen von Prandtl über die Strömungserscheinungen gesprochen. Letzteres scheint uns aber unzutreffend zu sein; vielmehr kann behauptet werden, daß die beiden Betrachtungsweisen sich gegenseitig ergänzen, indem die Prandtlsche Grenzschichttheorie die Erscheinungen in unmittelbarer Nähe der Körperoberfläche, bei gegebener Strömung im weiteren Felde, untersucht, Oseen dagegen eine Annäherung für den Verlauf der im ganzen Felde auftretende Strömung erstrebt, und dabei die Dicke der Grenzschicht auf der Vorderseite des Körpers auf Null gehen läßt.

Es muß aber bemerkt werden, daß die von Oseen gegebene Methode ihren Ausgangspunkt findet in einem Gleichungssystem, das nur für kleine Reynoldssche Kennzahlen gültig ist, und auch dann in der unmittelbaren Nähe des Körpers keine Verbesserung gegenüber dem Stokesschen System ergibt. Die von Oseen für den Grenzfall $\mu \to 0$ abgeleitete Bewegung kann nur unter der Einwirkung eines gewissen auf die Flüssigkeit ausgeübten Kräftesystems aufrechterhalten werden. Man kann auch andere linearisierte Gleichungssysteme angeben, die von vornherein mindestens gleichberechtigt erscheinen, welche aber für $\mu \to 0$ zu anderen Resultaten führen. Wie großen Wert man auch der sorgfältigen Diskussion der Eigenschaften des von Oseen untersuchten Gleichungssystems vom mathematischen Standpunkt beimessen muß, so möchte man doch vom physikalischen Gesichtspunkt einer einfacheren, wenn auch weniger strengen, Methode den Vorzug geben, welche für die stationären zweidimensionalen oder rotationssymmetrischen dreidimensionalen Fälle dasselbe Resultat ergibt, und außerdem die Erweiterung auf andere Gleichungssysteme naheliegend erscheinen läßt. In dem Anhang zu dem Buche, welcher über Untersuchungen von Zeilon berichtet, finden sich Ausführungen in dieser Richtung; auch von anderer

Seite ist hierüber schon früher publiziert worden. Es handelt sich dabei in der Hauptsache darum, daß man in den sogenannten Gleichungen für die Wirbelbewegung die Wirbel nicht durch die wahre Strömung mitschleppen läßt, sondern durch eine fiktive, von vornherein angenommene „Transportströmung", die soviel wie möglich der wirklichen Strömung ähnlich sein soll. Es würde jetzt als die nächstliegende Aufgabe der theoretischen Hydrodynamik erscheinen, nach Lösungen der in dieser allgemeineren Weise linearisierten Gleichungen zu suchen, im besonderen für den Fall, daß man in den Bestimmungsstücken der „Transportströmung" noch einen oder mehrere Parameter frei wählbar läßt. Wenn man dann nach der Prandtlschen Theorie die Eigenschaften der zu der so gefundenen Strömung gehörigen Grenzschicht untersucht, könnte es vielleicht gelingen, eine Beziehung zwischen der sog. Ablösungsstelle der Grenzschicht, und den Bestimmungsstücken der Transportströmung aufzustellen. Oseen selbst scheint eine Vorbereitung zu derartigen Untersuchungen durch einige Betrachtungen über den Begriff der „hydrodynamischen Rückseite" geben zu wollen (§ 25. 12).

Neben den allgemeinen Untersuchungen über die asymptotische Lösung des Gleichungssystems (b), gibt Oseen eine Anzahl von durchgerechneten Beispielen. Die bei der Lösung der zweidimensionalen Probleme verwendete Methode, welche von einem Theorem von Hilbert Gebrauch macht, läßt sich auch durch eine etwas einfachere ersetzen.

Im Anschluß an diese Ausführungen werden Berechnungen über die Resultierende der Druckkräfte auf den Körper gegeben. Hierbei macht sich der Umstand, daß die zugrunde gelegten Gleichungen nicht mit den wirklichen mechanischen Gleichungen übereinstimmen, deutlich bemerkbar, namentlich dadurch, daß Diskontinuitäten in der Druckverteilung im Felde auftreten. Man kann deshalb den Widerstand auch nicht ohne weiteres durch den Impulssatz mit dem Strömungsverlauf im weiter entfernten Teile des Feldes in Beziehung bringen. Dem Ref. möchte es scheinen, daß die Anwendung des Impulssatzes in § 31. 6 beim Problem der kreisförmigen Platte nicht einwandfrei ist. Wenn man den Widerstand durch direkte Integration des Druckes über die Körperoberfläche nach der in § 28. 3 dargelegten Methode (die sich auf den dreidimensionalen rotationssymmetrischen Fall erweitern läßt) berechnet, erhält man gerade die Hälfte des auf S. 316 gegebenen Betrages, in Übereinstimmung mit dem am Schluß von § 28. 3 ausgesprochenen Satz.

Zeilon hat eine Abänderung des Gesetzes der Druckverteilung angegeben, die im Falle des Kreiszylinders eine ziemlich gute Übereinstimmung mit den Erfahrungswerten möglich macht. Dies gelingt aber nur durch eine Änderung der Bewegungsgleichungen und der Randbedingungen, welche zwar in gewisser Hinsicht als eine Erweiterung der Oseenschen Resultate betrachtet werden kann, jedoch mit der bei der ursprünglichen Ausführung des Grenzüberganges aufgewandten mathematischen Strenge im Gegensatz steht.

Die ganze Frage des Widerstandes wird noch weiter zu bearbeiten sein. Man kann auch zeigen, daß, wenn man eine Lösung der vollständigen hydrodynamischen Gleichungen finden kann, die überall mit Ausnahme eines parabolisch anwachsenden Nachstromgebietes wirbelfrei ist, und bei dem die Entwicklung der Potentialfunktion im Uhendlichen ein Glied $-\frac{C}{4\pi R}$ oder $\frac{C}{2\pi}\lg R$ aufweist, der Impulssatz, dessen Anwendung dann erlaubt ist, für den Widerstand den Wert $\varrho C U$ ergibt. Um dann die experimentell gefundenen Widerstandswerte erhalten zu können, muß, wenigstens in den bis jetzt von Zeilon ausgearbeiteten Fällen, die Konstante C einen kleineren Wert haben, als die Oseensche Theorie für sie ergibt.

Man kann die Erkenntnis, daß man bei den wirklichen Bewegungen der Flüssigkeiten mit Potentialen zu rechnen hat, die im Grenzfall $\mu \to 0$ nur auf einen Teil der Körperoberfläche der Bedingung $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = U_n$ zu gehorchen haben, als ein ebenso wichtiges Resultat der Oseenschen Theorie betrachten, wie die Erweiterung der Stokesschen Gleichungen (a) zum System (b) für die sehr langsamen Bewegungen.

Zusammenfassend kann deshalb nochmals betont werden, daß die Oseensche Hydrodynamik sowohl durch die Art der Fragestellung wie durch die mathematische Behandlungsweise ein außerordentlich bedeutsames Werk bildet, und es läßt sich erwarten, daß die entwickelten Betrachtungen noch zu vielen weiteren Arbeiten Anregung geben werden.

J. M. Burgers.

A. Fraenkel, Einleitung in die Mengenlehre. (Die Grundlagen der mathematischen Wissenschaften in Einzeldarstellungen Bd. IX.) 3. Auflage. Gr. 8°. XIII und 421 S. Mit 13 Abb. Berlin, J. Springer. 1928. RM. 22.60, geb. RM. 24.—.

Die Tatsache, daß das Buch innerhalb dreier Jahre eine neue Auflage erfuhr, beweist das große Interesse, welches dasselbe bei Mathematikern und wohl auch bei Nichtmathematikern erweckte. Speziell die zweite Hälfte der Neuauflage, welche sich mit der Grundlegung der Mengenlehre und damit mit den Prinzipienfragen der Mathematik beschäftigt, hat einen doppelten Umfang wie die vorherige Auflage. Das Buch und die 1927 erschienene Schrift in der Sammlung „Wissenschaft und Hypothese" desselben Verfassers ergänzen sich gegenseitig. Wer sich für die Grundlagen der Mathematik interessiert, wird durch die Fraenkelschen Bücher einen Überblick über die modernen Strömungen und die neuesten Forschungen auf diesem Gebiete erhalten.

E. Hilb.

J. Plassmann, Himmels-Almanach für das Jahr 1929. Mit einer Sonnenfinsternis-Karte sowie Tafeln für die Monde der Planeten. 8°. 60 S. Berlin und Bonn, Ferd. Dümmler. 1929. RM. 3.50.

Der im zweiten Jahrgang erscheinende Himmelsalmanach ist ein sehr brauchbares Jahrbuch für Liebhaberastronomen und Schulen. A. Kopff.

Karl Menger, Dimensionstheorie. Gr. 8°. IV u. 319 S. Leipzig u. Berlin, B. G. Teubner. 1928. Geh. RM. 22.—, geb. RM. 24.—.

Das Buch hat in erster Linie Interesse für den abstrakten Mathematiker. Auf mengentheoretischer Grundlage wird der allgemeine Dimensionsbegriff festgelegt. Kapitel I bringt eine Einführung in die mengentheoretische Geometrie, II den Dimensions-

begriff, III behandelt die Frage nach der Dimension der Summe zweier n-dimensionaler Gebilde, IV untersucht die Struktur der n-dimensionalen Gebilde, zumal die Verteilung der Punkte verschiedenen dimensionalen Verhaltens, V bringt Zerlegungseigenschaften endlich dimensionaler Räume, VI Zusammenhangseigenschaften, VII stetige Abbildungen, VIII die Dimensionsverhältnisse in Cartesischen Räumen, IX das Hauptheorem von der topologischen Charakterisierung der mit Koordinaten beschreibbaren Räume. Im letzten, X. Kapitel wird eine kurze Zusammenfassung gegeben und es werden ungelöste Probleme zusammengestellt. Bei der modernen Entwicklung der mathematischen Physik ist es durchaus möglich, daß der in dem klar geschriebenen Buche behandelte Gegenstand auch einmal physikalische Anwendungen findet. E. Hilb.

Berichtigung

zu der Arbeit „Über die Stromleitung in Hochohmwiderständen und festen Isolatoren" von Fritz Regler. Diese Zeitschr. **29**, 869—873, 1928.

Auf Seite 871, rechte Spalte, 12. Zeile von oben muß es heißen: . . . Arbeiten (6, 7) sind . . . statt: Arbeiten (7, 8) sind.

Auf Seite 871, rechte Spalte, 11. Zeile von unten muß es heißen: . . . unter 3, 6 und 7 zitierten Arbeiten . . . statt: unter 3, 7 und 8 zitierten Arbeiten.

Auf Seite 872, linke Spalte, Text unter der Kurve muß es heißen: . . . Größe des Widerstandes[6]) . . . statt: Größe des Widerstandes[7]).

Berichtigung

zu der Arbeit „Viskosität und Strömungsorientierung" von S. Kyropulos. Diese Zeitschrift **29**, 942—947, 1928.

6. Zusammenfassung.

Auf Grund einfacher molekularphysikalischer Betrachtungen werden der Temperaturverlauf der Viskosität von Flüssigkeiten, insbesondere gewisser Öle, sowie die Diskrepanz zwischen den Befunden von Viskosimeter und Ölprüfmaschine gedeutet. Durch Versuche gestützt, wird auf die Wichtigkeit der Strömungsorientierung der Flüssigkeitsmoleküle für den Schmierungsvorgang und für andere Strömungsvorgänge hingewiesen.

Tagesereignisse.

Ferienkurs. Im Zoologischen Institut der Universität Jena (Schillergäßchen) wird vom 11.—16. März d. J. der VIII. Ferienkurs in Spektroskopie, Interferometrie, Refraktometrie und Kolorimetrie abgehalten, veranstaltet von Prof. Dr. P. Hirsch, Oberursel i. Th. und Dr. F. Löwe, Jena. Die Kurse bestehen in täglich 2—3 Stunden Vortrag und 3—4 Stunden Übung. Anmeldungen sind bis spätestens 9. März an Herrn A. Kramer, Jena, Schützenstraße 72 zu richten, der auch auf Wunsch über Unterkunftsmöglichkeiten (Hotels, Studentenzimmer) Auskunft erteilt. Die Teilnehmerzahl ist auf 50 begrenzt.

Personalien.

(Der Herausgeber bittet die Herren Fachgenossen, der Schriftleitung von eintretenden Änderungen möglichst bald Mitteilung zu machen.)

Habilitiert: An der Technischen Hochschule Braunschweig Dr. Ernst Lübcke für Technische Physik, an der Technischen Hochschule München Dr. Erwin Ferber für Färberei und organische Farbstoffe.

Ernannt: Der Privatdozent für Chemie an der Technischen Hochschule Stuttgart Dr. Ing. Eberhard Sauer zum a. o. Professor ebenda, der a. o. Professor an der Universität Heidelberg Dr. Heinrich Vogt zum planmäßigen Professor der Astronomie an der Universität Jena, der Privatdozent für Mathematik und Vermessungskunde an der Technischen Hochschule Breslau Dr. Edwin Feyer zum a. o. Professor ebenda, Professor Dr. Otto Hahn, bisher zweiter Direktor des Kaiser-Wilhelm-Institutes für Chemie in Berlin-Dahlem zum Direktor dieses Instituts, die Privatdozenten an der Technischen Hochschule Braunschweig Dr. Alfred Gehring (landwirtschaftliche Chemie), Dr. Ferdinand Krause (Chemie) und Dr. Hermann Senftleben (Physik) zu a. o. Professoren ebenda, der a. o. Professor an der Universität Wien Dr. Otto Fürth zum ord. Professor für angewandte medizinische Chemie ebenda, Ing. A. H. M. Andreasen zum Professor der Technischen Chemie an Polyteknisk Läreanstalt in Kopenhagen, der a. o. Professor an der Deutschen Technischen Hochschule Brünn Dr. techn. Albin Kurtenacker zum ord. Professor für analytische Chemie ebenda, der Dozent an der Technischen Hochschule Wien Dr. Ing. Josef Nußbaum zum a. o. Professor für Encyklopädie der chemischen Technologie ebenda.

Neuer Lehrauftrag: Der Privatdozent an der Universität Königsberg Dr. K. L. Wolf mit der Vertretung des Faches der Physikalischen Chemie in Übungen und Vorlesungen an der Universität Kiel.

Gestorben: Der Vorstand des Department of Chemistry an der Universität von New Hampshire in Durham N. H. Dr. Charles James, der Professor der Chemie an der Universität von Wisconsin George I. Kemmerer.

Angebote.

Jüngerer

Elektrophysiker

als Assistent des Abteilungsleiters

für theoretische und experimentelle Forschungsarbeiten auf dem Gleichrichtergebiet gesucht.

Ausführliche Bewerbungen mit Lebenslauf, Zeugnisabschriften, Gehaltsansprüchen, Angabe des frühesten Eintrittstermins sind zu richten unter Kennzeichen „Gleichrichter" an das Personal-Büro der

Bergmann-Elektrizitäts-Werke A.-G.

Berlin N 65

Für die Schriftleitung verantwortlich Prof. Dr. F. Harms in Würzburg. — Verlag von S. Hirzel in Leipzig.
Druck von August Pries in Leipzig.